

基于 RRT 算法的远距离自动泊车路径规划及仿真

周芳娟¹, 韩霜², 林俊舟², 张洪华¹

(1. 福州职业技术学院, 福建 福州, 350108; 2. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州, 510006)

摘要: 泊车路径规划是自动泊车技术的重要组成部分。本文分析了现有的泊车路径规划方法, 针对远距离自动泊车, 提出基于 RRT 算法的路径规划。根据实际泊车操作过程, 将自动泊车划分为远距离靠近泊位和泊入泊位两个阶段, 采用基于反向 RRT 算法分别设计满足车辆运动模型和避障要求的路径规划算法, 并在平行泊车、垂直泊车、反向斜方位泊车、正向斜方位泊车和角落平行泊车场景下进行仿真实验。

关键词: RRT 算法; 远距离; 自动泊车; 车辆调整控制; Reeds-Shepp 曲线

中图分类号: TP391.41; U463.6

文献标识码: A

Path Planning and Simulation of Long-distance Automatic Parking Based on RRT Algorithm

ZHOU Fangjuan¹, HAN Shuang², LIN Junzhou², ZHANG Honghua¹

(1. Fuzhou Polytechnic, Fuzhou 350108, Fujian, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: Parking path planning is an important part of automatic parking technology. This article analyzes the existing parking path planning methods, and proposes path planning based on RRT algorithm for long-distance automatic parking. According to the actual operation, the process of automatic parking was divided into two stages, that is, approaching the parking slot from a long distance and driving into the parking slot. Path planning algorithm that meets the requirements of vehicle motion model and obstacle avoidance was designed based on the reverse RRT algorithm. And simulation experiments were performed in the scenarios of parallel parking, vertical parking, oblique parking (reverse), oblique parking (forward) and parallel parking in the corner.

Key words: RRT algorithm; long-distance; automatic parking; vehicle adjustment control; Reeds-Shepp curve

1 引言

随着机动车拥有量的急速增长, 城市内停车空间日趋紧张, 泊车空间变得日益狭小, 部分泊车位的视野存在很大限制, 泊车过程中容易出现车辆刮蹭、碰撞等交通事故或难以停进泊位等现象, 自动泊车技术受到广泛关注。泊车路径规划是自动泊车技术的重要组成部分, 其目的是根据待停靠车辆和车位信息快速生成一条连续光滑且无碰撞的参考路径。

泊车路径规划方法主要包括经典路径搜索方法^[1-3]、基于数值优化的方法^[4-6]、基于深度学习的方法^[7]、基于预定义几何集的方法^[8-10]和基于随机搜索的方法。Dijkstra 等经典路径搜索方法可确保在有解的情况下求解出最短路径, 但耗时长效率低。基于数值优化的方法易将车辆自身、道路条件等约束条件加入到路径规划中, 使得求解路径可行且安全, 此外, 适合于在较短的时间内在局部求得最优解, 找到一条满足要求的泊车路径; 缺点是不能保证规划路径曲率的连续性且

收稿日期: 2024-02-01

作者简介: 周芳娟, 副教授, 硕士, 研究方向为交通运输

基金项目: 2022 年度福建省中青年教育科研项目 (科技类) “车群状态监测与管理系统开发研究” (编号: JAT220660)

对初值敏感。基于深度学习的方法具有强大特征学习能力、适应性强的优点，但也存在数据需求大、计算效率低，收敛困难等缺点。基于预定义几何集的方法是研究成果较丰富的领域，以平行泊车 and 垂直泊车应用场景居多，高效性、稳定性和通用性的优点显得尤为突出。基于预定义几何集方法需要针对不同泊车场景设计算法，应用中存在一定局限性，尤其体现在对复杂环境的适应性不足。基于随机搜索的泊车路径规划方法是通过随机采样和一系列判断来找到起点和终点间可行路线的一种方法，并不依赖于预定义的固定几何形状或规则，能够更灵活地处理较为复杂的泊车场景，如不规则车位、狭窄空间、动态障碍物等；同时，通过实时搜索和规划来寻找适合的路径，也能应对环境的变化和不确定性。

快速搜索随机树算法（RRT）利用增量式方法构建搜索树，广泛应用于机器人路径规划领域^[11-13]，逐步应用于自动泊车路径规划的研究中。苗兴超^[14]结合 A* 算法和 RRT* 算法，采用三次非均匀 B-spline 曲线对路径进行优化处理，为典型的垂直停车位设计了路径规划方法。李伟龙^[15]提出一种基于人工势场法与 RRT* 融合的路径规划算法（APF-RRT*-RS），结合 Reeds-shepp 曲线对 RRT* 算法节点扩展方式进行改进，设计了水平、垂直、斜式三种常见泊车场景路径规划。反向 RRT 算法主要特点是从目标点开始构建随机树，然后逐步向起始点搜索路径，从高约束区域往低约束区域探索有助于加快计算速度，故本文以反向 RRT 算法为基础设计自动泊车路径规划算法。

远距离自动泊车指车辆通过控制系统、算法等，实现自主寻找、规划路径并精准停入车位，包含车辆驶入停车场靠近泊位和车辆泊入泊位两个阶段。与传统的近距离自动泊车相比，远距离自动泊车能更早地开始泊车过程，减少寻找停车位的时间和行驶距离，提高泊车效率和便利性；但车辆需在更远距离上感知环境并进行路径规划。在停车场相对狭小的空间里，车辆泊入泊位之前的初始状态（位置和位姿）对能否成功泊车有重要影响。为避免由于车辆初始状态造成泊车死区而导致车辆多次腾挪或泊车失败的现象，本文将路径规划起点提前，将自动泊车过程分为远距离靠近泊位和泊入泊位两个阶段，基于反向 RRT 算法分别设计路径规划算法，并在平行泊车、垂直泊车、正向/反向斜方位泊车、角落平

行泊车等多种复杂泊车场景中进行仿真验证。

2 车辆运动学模型及泊车环境处理

2.1 车辆运动学模型

阿克曼转向几何通过内外转向轮胎转动不同的角度以实现汽车转向轮的圆心处于同一个点上，原理如图 1a 所示。由于车辆在泊车的过程中车速较低，车辆的侧向作用力和纵向作用力可以忽略，假设车辆行驶不会出现漂移和倾斜的情况下，可以将整个泊车运动过程看作是刚体的平面运动，车辆简化模型如图 1b 所示。图中各符号的含义如表 1 所示。

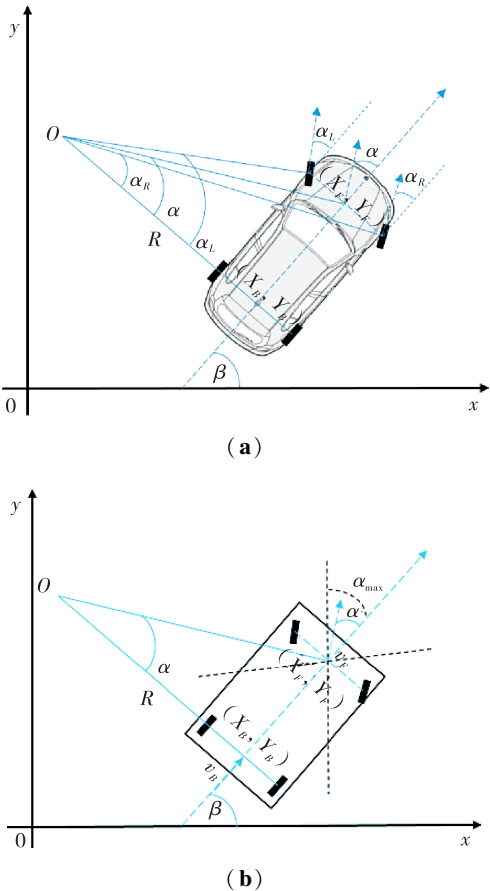


图 1 车辆模型示意图

表 1 符号说明

符号	意义	符号	意义
(X_F, Y_F)	前轮胎轴心位置	β	车辆的航向角
(X_B, Y_B)	后轮胎轴心位置	R	车辆的最大转向半径
α_L	左轮相对于车辆中轴线的角度	L	前后轴的轴距
α_R	右轮相对于车辆中轴线的角度	v_B	后轮轴心速度
α	车辆当前运动方向	v_F	前轮轴心速度
α_{Max}	最大转向角		

若前轮方向的速度为 v_F , 则上述模型在后轮轴心 (X_B, Y_B) 的速度 v_B 如式 (1) ~ (2) 所示:

$$v_B = v_F \cos \alpha \quad (1)$$

$$\text{即 } v_B = \Delta X_F \cos \alpha + \Delta Y_F \sin \alpha \quad (2)$$

前后轮的位移趋势与各自速度角度的正弦值相同, 前后轮运动约束如 (3) ~ (4) 所示:

$$\Delta Y_F \cos(\alpha + \beta) = \Delta X_F \sin(\alpha + \beta) \quad (3)$$

$$\Delta Y_B \cos \alpha = \Delta X_B \sin \alpha \quad (4)$$

根据前后轮关系可得式 (5):

$$\begin{cases} Y_F = Y_B + L \cos \alpha \\ X_F = X_B + L \sin \alpha \end{cases} \quad (5)$$

联合 (1) ~ (5) 可计算车辆横摆角度 δ (即 $\Delta \beta$), 车辆运动学模型如式 (6) 所示:

$$\begin{cases} \Delta Y_B = v_B \cos \alpha \\ \Delta X_B = v_B \sin \alpha \\ \Delta \beta = \frac{v_B}{L} \tan \beta \end{cases} \quad (6)$$

2.2 泊车环境处理

为便于采集环境信息, 将环境进行栅格化处理, 即将环境分割为大小相同的若干个方块, 并在每个方块上赋予其权值, 权值可表示该方块处是否存在障碍物。本文令障碍物区域的权值为 1, 可通行区域的权值为 0。根据自动泊车所需的安全性能需求, 应使规划的行驶路线与障碍物保持一定的安全距离, 故根据栅格化后的地图, 对障碍物进行膨胀处理。

车辆路径规划过程中, 需要检测是否会发生车辆与障碍物碰撞的情况, 本文将车辆边界离散化为若干个节点, 再对这若干个节点进行判断。用集合 C 表示车辆所有边界点的坐标, 若存在 $M(C) = 1$, 则表示该车辆边界点中有被地图模型标记为 1 的点, 即车辆会与障碍物发生碰撞, 应取消该路径段。

3 基于 RRT 的自动泊车两阶段路径规划算法设计

3.1 远距离靠近泊位路径规划算法

远距离靠近泊位路径规划以在众多障碍物或狭窄地形中规划一条符合车辆运动学的路径并尽快靠近泊位为目的, 路线必须符合安全性、平顺性、经济性的要求。安全性指规划结果需完全与障碍物无触碰, 保证车辆和人身安全; 平顺指在车辆行驶过程中不出现急转方向盘的情况, 前轮转向角的变化曲线连续平顺、转向角度变化率合

理; 经济性指行驶路线不存在绕圈、绕路等情况。远距离靠近泊位算法包括初始路径生成、路径平滑和车辆调整控制三个部分, 该算法在获得导向路径的前提下, 根据车辆调整控制模型驶近导向点, 采用分段打靶方式规划出车辆路径。

3.1.1 初始路径生成

导向路径生成的基本流程如下:

Step 1: 初始化地图、起点 P_{star} 、终点 P_{goal} 和车辆信息。

Step 2: 倒转起终点, 将 P_{goal} 作为起点加入随机探索树。

Step 3: 随机生成数 rand , 若 rand 大于牵引率 P , 则生成目标点为随机点 P_{rand} , 若 rand 小于牵引率 P , 则生成目标点为终点。

Step 4: 判断树中所有节点与目标点的距离, 并取近距离的点为 P_{near} 。

Step 5: 判断 P_{near} 与 P_{rand} 的距离是否大于步长 S , 若是, 则以 P_{near} 为原点、以 $P_{\text{near}} - P_{\text{rand}}$ 为方向计算长度为 S 的坐标为 P_{new} ; 若否, 则以 P_{rand} 为 P_{new} 。

Step 6: 判断 P_{near} 与 P_{new} 的连线是否与障碍物碰撞; 若是, 则转到 Step 3, 若否, 则将 P_{new} 作为 P_{near} 的子节点加入随机探索树中。

Step 7: 判断树中最末端节点是否可达终点并无碰撞, 若是, 则转至 Step 8; 若否, 则转到 Step 3。

Step 8: 生成初始路径。

3.1.2 路径平滑

为满足平顺性要求, 对初始路径进行平滑, 引入平滑长度 D , 以确保路径与障碍物间的距离并增加路径平顺性, 具体流程如下:

Step 1: 导入初始路径 RRT_path 。

Step 2: 令平滑路径为 smooth_path , 节点 $\text{smooth_path}(1) = \text{RRT_path}(1)$ 。

Step 3: 令 i 为 RRT_path 的最大节点数。

Step 4: 判断 $\text{RRT_path}(i)$ 与 $\text{smooth_path}(\text{end})$ 连线是否碰撞障碍物或连线长度是否大于平滑长度 D , 若是, 则令 $i = i - 1$, 重复执行 Step 4; 否则转至 Step 5。

Step 5: 将 $\text{RRT_path}(i)$ 加入 $\text{smooth_path}(\text{end})$ 的末尾。

Step 6: 判断 $\text{smooth_path}(\text{end})$ 与 $\text{RRT_path}(\text{end})$ 的连线是否碰撞障碍物或连线长度是否大于平滑长度 D , 若是, 则将 RRT_path 的节点 $1 \sim i$ 删除, 转至 Step 3; 否则转至 Step 7。

Step 7: 将 RRT_path (end) 加入 smooth_path (end) 的末尾。

3.1.3 车辆调整控制模型

为避免车辆被困卡顿区域无法驶出, 本文采用可前后行驶调整位置的车辆控制模型, 该模型设置前进和倒车、直行前进和直行倒车、反向前进和反向倒车 6 种运动形式, 使车辆在遇到不可直达区域或遇到障碍物时可以灵活调整车辆位置并继续前行。图 1b 中, 以前轮最大转向角 $\pm \alpha_{\text{Max}}$ 为界将整个区域划分为 6 个子域, 车辆正前和正后方 $\pm \alpha_{\text{Max}}$ 的子域为车辆前轮直接转向可直达区域, 余下区域为前轮转向不可直达区域。当目标位置在可直达区域时, 直接旋转对应的角度即可到达; 当目标位置在不可直达区域时, 通过匀速转动方向盘使车辆平滑地转向目标位置直至前轮角度转至最大值或当目标位置进入车辆的前轮转向可达区域时转为相应的控制。为应对目标位置在前轮转向不可直达区域时, 设置可前进和倒车两种控制模式, 在前进模式中采取向前行驶策略, 在倒车模式中采取倒车行驶策略, 反向前进和倒车是对前轮转角进行取反来实现, 而直行前行和直行倒车则通过将前轮转向角固定为 0 来实现, 上述控制策略使车辆能够突破卡顿区域重新回到规划路径。车辆调整控制模型基本流程为:

Step 1: 初始化车辆数据, 令 $i = 1$ 。

Step 2: 以导向路径的第 i 个点为向导点, 若 i 大于总导向路径节点数量, 则转至 Step 11。

Step 3: 将向导点作为车辆目标点, 规划车辆前进路线。

Step 4: 改变车辆控制策略为前进, 检测车辆是否碰撞障碍物, 若是, 转至 Step 5; 若否, 则转至 Step 10。

Step 5: 改变车辆控制策略为倒车, 检测是否可获得有效移动, 若是, 转至 Step 4; 若否, 则转至 Step 6。

Step 6: 改变车辆控制策略为直行前进, 检测是否可获得有效移动, 若是, 转至 Step 4; 若否, 则转至 Step 7。

Step 7: 改变车辆控制策略为直行后退, 检测是否可获得有效移动, 若是, 转至 Step 4; 若否, 则转至 Step 8。

Step 8: 改变车辆控制策略为反向前进, 检测是否可获得有效移动, 若是, 转至 Step 4; 若否, 转至 Step 9。

Step 9: 改变车辆控制策略为反向倒车, 检

测是否可获得有效移动, 若是, 转至 Step 4; 若否, 车辆进入无法脱困状态, 重新计算导向路线。

Step 10: 检测车辆是否到达目标点附近, 若是, 令 $i = i + 1$ 并转至 Step 2; 若否, 则转至 Step 4。

Step 11: 输出车辆行驶路径。

3.2 泊入泊位路径规划算法

泊入泊位阶段以获得快速安全的泊入路径为目标, 且必须能够在任意起始点位姿及任意泊位类型的条件下将车辆无碰撞地泊入停车位。运动车辆位姿能为自主车辆自身的运动路径规划提供可靠依据^[18]。本文将 Reeds-Shepp 曲线嵌入反向 RRT 设计泊入路径规划算法, 在随机搜过程中基于 Reeds-Shepp 曲线计算不同位置和位姿的车辆间的距离。Reeds-Shepp 曲线可在一定转弯半径下, 通过前进和后退求解从起点到终点的最短路径且可以满足指定的起始角度和终点角度; 在前轮转向角变化时不考虑连续性, 非常适合用于需要急转方向盘突变方向的泊车工况。本算法利用 Reeds-Shepp 曲线对反向 RRT 算法的改进主要如下:

(1) 将反向 RRT 算法随机生成的目标点替换为目标车辆位姿 (X, Y, ϕ) 。

(2) 在选择 P_near 节点时, 计算树中所有节点到目标位姿的 Reeds-Shepp 曲线长度, 选择与障碍物无碰撞且 Reeds-Shepp 曲线长度最短的节点为父节点。本阶段算法可分为泊入路径生成和路径平滑两部分。

3.2.1 泊入路径生成

Step 1: 导入地图、车辆起始位姿、终点泊位位姿信息。

Step 2: 以一定概率生成随机位姿或使用终点泊位位姿作为目标位姿。

Step 3: 判断目标位姿是否合法, 若合法, 转至 Step 4; 若不合法, 则转至 Step 2。

Step 4: 选择随机树中所有节点与目标位姿距离最短且无碰撞的节点作为目标位姿的父节点。

Step 5: 判断随机树中所有节点位姿是否已到达终点泊位位姿, 若否, 转至 Step 2, 若是, 则转至 Step 6。

Step 6: 根据随机树中父节点关系提取泊入路径。

3.2.2 路径平滑

初始泊入路径通常比较复杂且较长, 并不适合实际泊车, 需对路径进行平滑处理。平滑过程中, 以初始路径节点与平滑路径终点间的 Reeds-Shepp 曲线为依据来判断路径是否会碰撞障碍物, 其余流程与第一阶段平滑流程相似, 在此不再进行赘述; 为避免初始路径噪声点对路径平滑的干扰, 在一次平滑之后, 将路径整体翻转后再进行二次平滑。

4 仿真实验与结果分析

4.1 算法通用性分析

为验证两阶段远距离自动泊车算法的通用性, 采用 MATLAB 编程, 在 CPU 为 Intel (R) core (TM) i7 - 7500U, 内存为 8 GB 的计算机上进行平行泊车、垂直泊车、反向斜方位泊车、正向斜方位泊车和角落平行泊车仿真实验, 实验参数设置如表 2 所示, 泊位尺寸设置小于等于《车库建筑设计规范》(JGJ100—2015) 中的规定。

表 2 实验参数

参数类型	数值
车辆参数	前悬 1.1 m; 后悬 1.0 m; 轴距 2.8 m; 车宽 1.8 m; 最大转向角 35°
垂直泊位参数	长度为 5.1 m; 宽度为 2.0 m
平行泊位参数	长度 6.0 m; 宽度 2.4 m
斜向泊位参数	长度 5.2 m; 宽度 2.0 m

仿真结果如图 2 所示, 各子图左侧图形中的绿色虚线为导向路径, 蓝色实线为远距离靠近泊位的规划路径, 红色实线为泊入泊位的规划路径; 右侧图形为泊车轨迹线。图 2a 中, 泊位方位与车辆前进方向相反, 车辆须进行一次掉头, 才能泊入泊位, 实验结果显示, 本文设计的算法可规划出掉头路径并调整车辆位姿, 最终车辆成功泊入泊位; 图 2b 中, 车辆按照导向路径进入过道时, 如果继续保持原前进状态, 会碰撞到障碍物, 此时车辆采取反向前进方式躲过障碍物继续前进并顺利泊入泊位; 图 2c 中, 过道面积偏小, 泊车路径规划难度大, 该路径规划中, 车辆采取反向进入过道的操作, 在车位与过道形成锐角的情况下计算出了一条无碰撞的线路, 顺利泊入车位; 图 2d 中, 因要求车辆正向进入车位, 所以在泊入泊位阶段为车辆规划了一段前进路线, 然后再倒车进入斜方位泊位; 图 2e 中, 泊位为左下角的平行泊位, 正上方和正右方距离非

常近的位置均有车辆阻挡, 泊入该车位的角度有限, 泊入/出的难度相当大, 此次路径规划选择了右方的一个小缺口进行两次倒车往返操作, 使车辆尾部调转, 从而成功泊入该车位。仿真结果证明, 本文所设计的两阶段自动泊车路径规划算

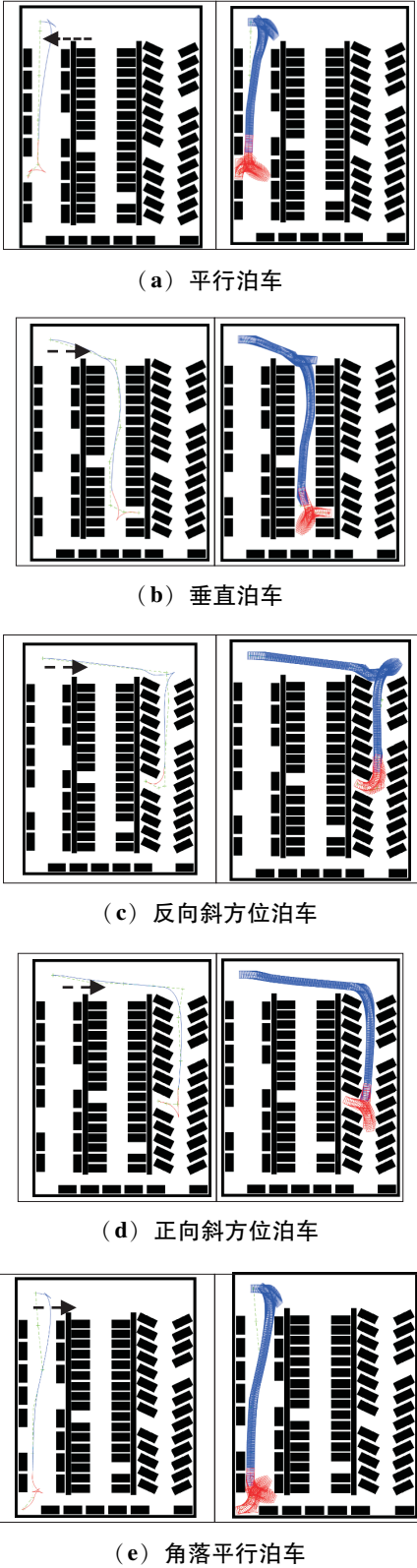


图 2 多工况泊车路径规划图

法具有较强的通用性,可以满足多种泊车场景和多个障碍物的远距离泊车要求。

4.2 算法稳定性分析

为测试远距离自动泊车路径规划算法的稳定性,分别在平行泊车、垂直泊车和斜方位泊车三种场景下,各以相同的外界条件进行100次仿真,对倒车次数和求解时间进行统计,结果如表3所示。从表3可知,在三种泊位场景下,泊车路径倒车次数的均值分别为2次、1.30次和1.03次,标准差分别为0.69、0.60、0.17;求解时间均值分别为4.40 s、4.25 s和3.97 s,标准差分别为2.28、2.53和2.18,说明通过本算法可较稳定地求出规划路径,且泊车路径倒车次数和求解时间在可接受范围。

表3 算法稳定性分析

工况	倒车次数				求解时间/s			
	均值	标准差	最大值	最小值	均值	标准差	最大值	最小值
平行泊车	2	0.69	4	1	4.40	2.28	10.51	0.27
垂直泊车	1.30	0.60	3	1	4.25	2.53	11.40	1.19
斜方位泊车	1.03	0.17	2	1	3.97	2.18	10.47	0.83

5 结论

本文将自动泊车路径规划分为远距离靠近泊位与泊入泊位两个阶段,以反向RRT算法为基础,分别设计了各阶段的求解算法。在远距离靠近泊位阶段,加入平滑长度限制对初始路径进行平滑、结合可前后行驶的车辆调整控制策略避免车辆被困卡顿区域,并使用分段打靶的方式进行导向路径跟踪;在泊入泊位阶段,采用Reeds-Shepp曲线改进反向RRT算法进行路径规划,为减小初始路径中噪声点对路径平滑的影响,在路径一次平滑后将路径整体翻转再次进行平滑。在平行泊车、垂直泊车、反向/正向斜方位泊车和角落平行泊车场景下进行仿真,结果表明,本算法可以在上述泊车场景中成功规划出远距离靠近泊位和泊入泊位的路径,具有较强的通用性,并在相同外部条件下进行多次仿真,实验表明,本算法规划的路径倒车次数、求解速度标准差较小,可稳定地求解上述场景下的泊车路径。

远距离自动泊车路径规划方法可使自动泊车系统介入泊车过程的时间提前,减轻驾驶员泊车压力,车辆在泊入泊位前处于较好的初始状态,有利于提高泊车效率和成功率。随着智能汽车技

术的发展,自动泊车技术应用场景不断扩展,结合与车辆周边环境的实时信息及地图数据^[16]、汽车行驶速度、最优切换点等进行泊车路径规划并提高算法效率是后续探讨的方向。

参考文献:

- [1] 毛国龙,张亚秋,赵海茹.一种停车场最优停车路径规划设计[J].价值工程,2024,43(1):97-99.
- [2] 汪厚俊,郑明飞.基于改进Dijkstra算法的医院智慧停车路径规划研究[J].微型电脑应用,2022,38(5):120-124.
- [3] 郭展宏,马殷元,杨志雄,等.改进Dijkstra算法在停车场车辆泊车路径搜索中的应用[J].传感器与微系统,2020,39(6):158-160.
- [4] 胡杰,朱令磊,陈瑞楠,等.狭小车位平行泊车路径规划方法研究[J].汽车工程,2022,44(7):1040-1048.
- [5] 钱炎,王兆强,李培兴,等.基于二次线性规划的自动泊车的控制方法[J].信息与控制,2021,50(6):660-668.
- [6] 甘能,赵克刚,裴锋,等.基于伪谱拼接法的自动泊车路径规划[J].重庆理工大学学报(自然科学),2019,33(4):26-31.
- [7] 陈鑫,兰凤崇,陈吉清.基于改进深度强化学习的自动泊车路径规划[J].重庆理工大学学报(自然科学),2021,35(7):17-27.
- [8] 熊斌,钟益林,彭邦煌,等.一种基于轨迹预判的垂直泊车路径规划算法研究[J].汽车电器,2023(9):19-25.
- [9] 李克强,古谚湛,王永胜,等.基于预定义几何集的斜列式泊车路径规划方法[J].中国公路学报,2021,34(12):1-11.
- [10] 黄艳国,夏金龙,钟勇,等.基于提出Frenet坐标系的平行泊车路径规划[J].农业装备与车辆工程,2023,61(12):104-109.
- [11] 陈慧敏,窦培林,赵世发,等.交互式水域环卫机器人的避障路径规划算法[J].造船技术,2023,51(04):6-13.
- [12] 康博涵,黄静雯.基于环境复杂度的移动机器人变步长RRT路径规划算法与仿真研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2023,50(4):87-93.
- [13] 陈建科.复杂环境下基于改进RRT算法的移动机器人路径规划算法研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2023.
- [14] 苗兴超.自主泊车路径规划与跟踪控制方法研究[D].西安:长安大学,2023.
- [15] 李伟龙.基于改进RRT*的自动泊车路径规划方法研究[D].西安:长安大学,2022.
- [16] 张雷.自动泊车技术研究[J].汽车测试报告,2023(11):58-60.