

10.16638/j.cnki.1671-7988.2025.006.009

基于几何曲线和改进混合 A^* 的平行泊车 路径规划

贾海峰, 施文征

(阿尔特汽车技术股份有限公司 工程研究二院智能网联部, 北京 100080)

摘要: 在泊车场景复杂的情况下, 现有的平行泊车算法存在环境适用范围小、计算时间长、失败率高等问题, 为了解决这一问题, 设计了一种基于几何曲线和改进混合 A^* 的自动泊车路径规划算法。首先, 根据阿克曼的转向理论建立了汽车的运动学模型; 其次, 设计了几何曲线法来对简单的平行泊车场景进行路径规划; 然后, 设计了一种改进混合 A^* 来提高复杂平行场景泊车的规划成功率; 最后, 利用仿真软件进行仿真分析并实车验证。结果表明, 基于几何曲线和改进混合 A^* 的自动泊车路径规划算法能够有效地扩大泊车环境适用范围, 增强计算能力, 提高平行泊车规划成功率, 并在泊车领域具有非常广泛的应用前景。

关键词: 自动泊车; 平行泊车; 几何曲线法; 改进混合 A^* ; 路径规划

中图分类号: TP319; U462 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-7988(2025)06-52-08

Parallel Parking Path Planning Based on Geometric Curves and Improved Hybrid A^*

JIA Haifeng, SHI Wenzheng

(Intelligent Network Department of the Second Academy of Engineering Research,
IAT Automobile Technology Company Limited, Beijing 100080, China)

Abstract: In the case of complex parking scenarios, the existing parallel parking algorithms have some problems such as small scope of application, long computing time and high failure rate. In order to solve these problems, an automatic parking path planning algorithm based on geometric curves and improved hybrid A^* is designed. Firstly, the kinematic model of the vehicle is established according to Ackermann's steering theory. Secondly, the geometric curve method is designed to plan the path of the simple parallel parking scene. Then, an improved hybrid A^* is designed to improve the success rate of parking planning in complex parallel scenes. Finally, simulation software is used to carry out simulation analysis and real vehicle verification. The results show that the automatic parking path planning algorithm based on geometric curves and

收稿日期: 2024-08-27

作者简介: 贾海峰 (1995—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为智能驾驶系统的软件功能开发, E-mail: 1096296866@qq.com

improved hybrid A* can effectively expand the application scope of parking environment, enhance computing power, improve the success rate of parallel parking planning, and has a very wide application prospect in the parking field.

Key words: automatic parking; parallel parking; geometric curve method; improved hybrid A*; path planning

近年来,随着经济的发展,汽车的保有量不断增加,由此所带来的车位不足、空间小、泊车环境越来越复杂的问题越来越严重,因此,自动泊车系统已经受到了广泛的关注并逐渐成为新的研究热点^[1]。路径规划又是自动泊车系统的重要组成部分,其作用就是根据已知的周围环境快速规划出一条合理路径供车辆行驶。与垂直泊车工况相比,平行泊车工况在路径规划和环境要求等方面都更复杂,所以对平行泊车工况条件下的路径规划研究就显得尤为重要。当前,常用的路径规划方法有几何曲线法、随机采样法、图搜索法、混合A*法等。

几何曲线法主要是采用圆弧和直线拼接的方法形成路径,优势是计算效率很高,可以快速得到泊车路径,但是在圆弧和直线的拼接处会出现曲率不连续的问题,而且当泊车的周围空间较小时,车辆无法通过预设的曲线和直线到达车位造成路径规划失败^[2]。

随机采样法^[3]的优势在于直接对状态空间进行采样,因此其具有完备性,即当采样点足够多时,一定能得到可行解。但由于车辆自身是非完整性约束,车辆具有横纵坐标与航向角三个状态变量,采样维度的上升会导致采样数成指数倍增长。同时由于采样的随机性,在自动泊车对于规划路径的精度要求较高的场景下,规划所用的时间较高且路径规划一般不是最优的。

图搜索法依靠已知的环境地图以及地图中的障碍物信息并将地图栅格化,然后构建从起点到终点的路径,包括深度优先和广度优先两个方向^[4]。优势就是实时性较好,能够快速得到全局最优路径,能适应低维空间的动静态环境,但生成的路径连续性较差 且在高维空间搜索性能不可靠。

混合A*考虑了车辆自身的非完整性约束^[5],得到的路径不会产生曲率突变可以直接跟踪,但由于是搜索型算法可能得到路径的时间较长且由于其通过采样控制变量,经过计算间接获得状态变量使其不再具有完备性。

针对当下平行泊车的泊车环境适用范围小,计算时间长,失败率高等问题。本文提出一种结合几何曲线和改进混合A*的泊车路径规划方法,增加场景划分模块来判断场景类型以采用不同的路径规划方法。有效扩大泊车场景适用范围,增强计算能力,提高平行泊车规划成功率。

1 自动泊车及路径规划框架

1.1 自动泊车整体框架

自动泊车系统主要包括三个部分:环境感知(环境信息、感知单元)、决策控制单元及执行机构^[6],系统框架如图1所示。

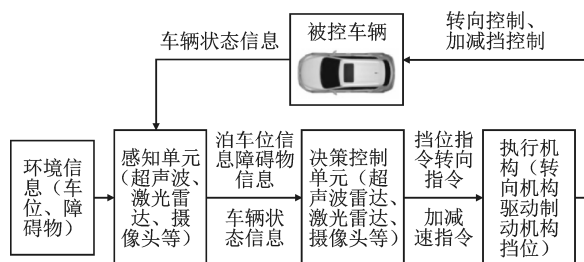


图1 自动泊车系统框架

1.2 路径规划系统框架

以平行泊车场景为例,得到如图2所示的路径规划流程框图。

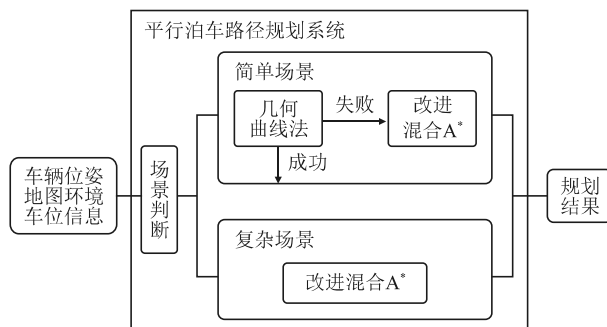


图2 路径规划流程框图

当规划模块收到规划的命令时,先根据车辆位姿、地图环境、车位信息等信息对当前的泊车场景进行判断,如果为简单场景则先使用几何曲线法进行规划,成功则直接输出规划结果,失败

则用改进混合 A* 进行规划。如果为复杂场景则略过几何曲线法直接用改进混合 A* 规划出一条无碰撞的粗糙轨迹, 然后进行平滑, 节省规划时间, 并提高成功率。

2 车辆低速运动学模型

车辆的模型尺寸和运动学模型直接影响路径和避障的效果, 在自动泊车的过程中建立车辆的运动学模型能够清楚地反映车辆在运动过程中的位置坐标和位姿状态。由于泊车的过程车速较低, 所以在建立运动学模型时可以忽略车辆侧倾和轮胎滑移, 图 3 为车辆低速运动学模型。

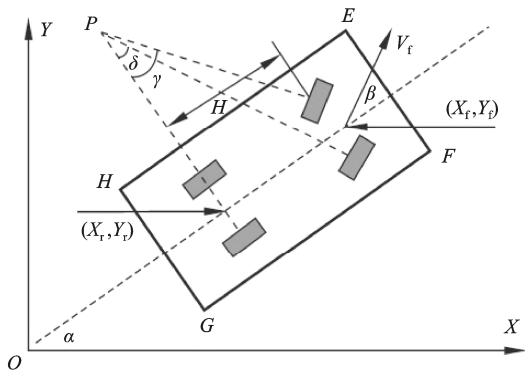


图3 阿克曼理论模型示意图

进而可得:

$$X_T = \cos \delta \times V_T \quad (1)$$

$$Y_T = \sin \delta \times V_T \quad (2)$$

$$\theta = \frac{\tan \theta \times V_T}{H} \quad (3)$$

式中, X_T 、 Y_T 分别为后轴中心点坐标; θ 为简化后的前轮转向角度; V_T 为前后轴中心点的速度。

3 几何曲线法

自动泊车中路径规划的关键是保证规划出来的路径尽可能地平顺, 符合车辆正常行驶条件, 而且对于量产车而言稳定性和实用性更是重中之重。相比于搜索式路径规划, 基于几何曲线的方法规划出来的路径更加符合驾驶员的驾驶习惯, 而且规划过程稳定, 计算效率高, 可快速得到路径。

平行车位是在路边停车最常见的车位形式, 但车位分为左右两侧, 首先将左侧的车位镜像到右侧, 这样算法就只需要考虑右侧的情况即可; 然后根据车位的信息, 选择车位左上角点设置一

个新的车位坐标系, 并将世界坐标系和车辆坐标系中的所有有关路径规划的信息都转换到车位坐标系上, 这样有利于车辆在规划过程中参数的确定; 最后再根据驾驶员的驾驶习惯, 将车辆泊入平行库位的整个过程划分为三个阶段:

1) 库外调整段: 通过直线和圆弧的组合使车辆进入到能够泊入目标车位的起始位置。

2) 泊入段: 通过直线和圆弧的组合使车辆从库外泊入到平行库位内。

3) 库内调整段: 由于车位空间的限制和跟踪控制的误差, 导致车辆未完全到达目标位姿, 通过直线和圆弧的组合进行库内姿态调整。

3.1 库外调整段

获取当前车辆位置 (车辆坐标、车身角度), 然后确定库外调整段的轨迹类型。一般先假设库外调整段为直线, 根据当前车辆位置求出轨迹直线的方程。

若库外调整段为直线, 在后面的泊入段和库内调整段无法计算出有效的轨迹, 则库外调整段调整为圆弧, 并按照一定的角度先将方向盘向左, 角度逐渐递增, 如图 4 所示。如果向左到最大角度仍然无法计算出泊入段和库内调整段, 则将方向盘按固定角度向右, 角度逐步递增, 直至找到有效的泊入段和库内调整段, 如果打到右侧方向盘最大转角仍未找到路径, 则路径规划失败。

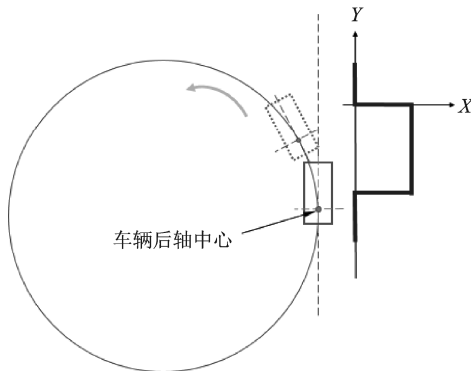


图4 库外调整段为圆弧

3.2 库内调整段

根据所检测到的车位大小, 计算出在车位内的泊车轨迹。如果车位太小, 无法算出轨迹完成泊车, 则返回库外调整段。

首先, 计算实现一次进库泊车 (三阶段泊车) 的最小车位长度及库内调整段的数据。一次进库所需要的最小车位的长度应满足如下条件:

1) 车辆以最小转弯半径行驶, 在进入车位过程中, 与车位前面障碍物拐角的距离刚好等于规

定的车辆行驶时前面障碍物的安全距离。

2) 车辆泊车终点位置处, 车辆后保险杠与后面障碍物的距离刚好等于规定的车辆后面障碍物安全距离。

比较当前检测到的车位长度与所计算出的实现三阶段泊车的最小车位长度, 如果前者大于等于后者, 则可以用三阶段完成泊车, 根据当前测到的车位长度大小, 计算合适的泊车终点。

如果当前车位的长度小于三阶段泊车的最小车位长度, 则无法实现三阶段泊车, 根据车位长度, 反算出车辆在当前车位内的泊车轨迹。反算的方法是根据车辆泊车终点位置的两种极限情况进行计算, 让车辆在车位内以最小转弯半径前后行驶, 直至能够开出车位为止。两种极限情况为车辆泊车终点靠近前面障碍物(反算的第一步向后行驶, 即泊车轨迹的最后一步为向前行驶)和车辆泊车终点靠近后面障碍物(反算的第一步向前行驶, 即泊车轨迹的最后一步向后行驶), 如图5所示。

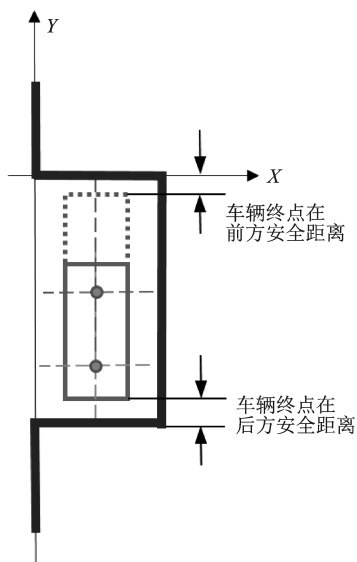


图5 车辆库内两种极限情况

反算时, 先以车辆泊车终点靠近前面障碍物的情况进行反算, 如图6所示。如果两步无法驶出障碍物, 再以车辆泊车终点靠近后面障碍物的情况进行反算; 如果三步无法驶出车位, 再以车辆泊车终点靠近前面障碍物的情况反算; 如果四步无法驶出车位, 两种情形交替反算, 直到能够算出车辆驶出车位为止。反算的极限是反算的步数不能超过规定的车位内最大的泊车步数, 如果超过该值, 则库内调整段规划失败。

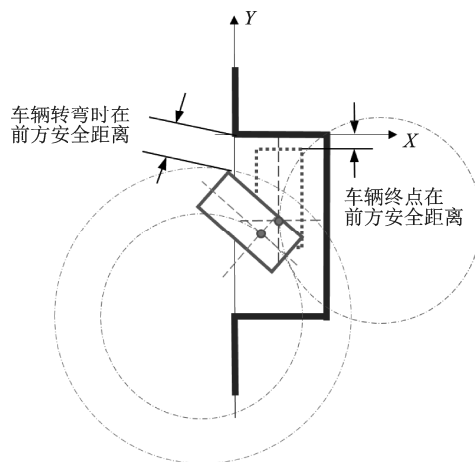


图6 泊车终点靠近前面障碍物

3.3 泊入段

泊入段的方向盘转角大小从给定的值开始在最大和最小方向盘转角之间搜寻, 根据给定的泊入段的方向盘转角计算泊入段的转弯半径, 根据库外调整段和库内调整段的轨迹, 计算泊入段的泊车轨迹。

1) 如果库外调整段是直线轨迹, 根据泊入段的转弯半径计算与库外调整段直线和库内调整段圆相切的公切圆。

2) 如果库外调整段是圆形轨迹, 根据泊入段的转弯半径计算与库外调整段圆和库内调整段圆相切的公切圆。

3) 计算泊入段圆的相切点坐标以及相切点处的车身角度, 并判断车辆从当前位置按照所计算的轨迹库外调整段和泊入段行驶到目标圆库内调整段上的过程中, 是否会碰到障碍物, 各相切点处的车身角度是否能够到达, 如果可以, 则说明所计算的库外调整段和库内调整段轨迹合理。否则, 泊入段的方向盘转角大小根据给定的增量进行改变, 继续求解库外调整段和库内调整段的公切圆。

在计算出合理的库外调整段和泊入段轨迹的基础上, 在泊入段和库内调整段之间插入一步直线泊车过程, 以减小车辆行驶轨迹的误差:

1) 在泊入段和库内调整段之间插入直线的方法, 根据所求得的泊入段圆的转弯半径的大小来向左或向上移动泊入段的圆心位置。

2) 将泊入段圆的圆心移位之后, 重新计算泊入段圆转弯半径的大小。

3) 如果计算出的新的泊入段的转弯半径合

理,则检查当车辆在泊入段行驶经过停车位上方的拐角时,车身距离拐角最小距离是否大于规定的安全距离。

根据计算出的新的泊入段圆和库内调整段圆,计算两圆之间的公切线,在所得到的 4 条公切线中,斜率最小的那条是所需的直线泊车轨迹。检查车辆从当前位置按照所计算的轨迹泊车,各泊车阶段的车身角度是否正确,同时检查各泊车阶段的行驶过程中是否会碰到障碍物,如果各泊车阶段的车身角度都正确,并且在车辆依轨迹行驶的过程中不会碰到障碍物,则计算得到的库外调整段、泊入段和直线段就是停车位外的泊车轨迹。如果计算出错,则泊入段的方向盘转角大小根据给定的增量进行改变,继续求解库外调整段和库内调整段的公切圆。如果泊入段的方向盘转角已搜寻了整个范围还是未能找到可行的轨迹,则泊入段计算失败。

4 改进混合 A*算法

4.1 混合 A*算法

混合 A*算法的代价函数如式(4)所示,算法由代价函数计算代价值选择最优节点。

$$f(n)=g(n)+h(n) \quad (4)$$

式中, n 为当前节点; $g(n)$ 为地图中从初始节点到当前节点 n 的实际代价值; $h(n)$ 为当前节点 n 到目标节点最短路径的估计代价值。

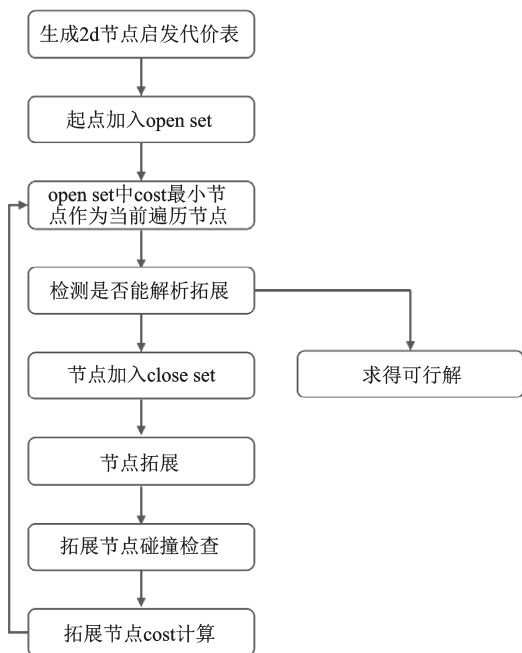


图7 混合 A*求解过程

混合 A*算法的实现步骤如图 7 所示。根据启发函数估计扩展节点到目标点的代价值,并选择代价值最低的节点作为最优节点,保存最优节点并在最优节点处使用符合车辆运动学模型^[7]的扩展方式,扩展出多个待选节点,重复操作形成一组最优节点集。本文使用二维栅格地图^[8]作为混合 A*算法的搜索空间,并将阿克曼模型作为车辆运动学模型进行试验。

4.2 RS 曲线

Reed-Shepp 曲线(下文简称 RS 曲线)被 J.A. Reeds、L.A. Shepp 提出,即给定起点和终点,可以通过固定半径的圆弧和直线进行连接。圆弧和直线的组合一共有 48 种,他们证明,任意的最短路径的组合都在 48 种组合之中^[9],同时给出了 48 种组合的解析解及其求解方法。

4.3 改进混合 A*算法

混合 A*是一种状态空间启发函数,能够在搜索过程中引入启发信息,对状态空间中的每个搜索位置进行评估,得到最好的位置,再从这个位置进行下一步的搜索直到目标。这样可以省略大量无效搜路径,提高搜索效率,但当泊车场景复杂时,混合 A*的搜索时间则会大幅增加。本文设计了一种改进混合 A*,在混合 A*每次走完一个节点后尝试用 RS 曲线连接当前点与目标点,若成功,则规划完成;若失败,则混合 A*则继续搜索下一个节点,这样就可以快速得到一条粗糙的曲线。

用改进混合 A*规划出一条无碰撞的可行轨迹,但是这个轨迹有一个问题,即轨迹曲线可能会产生突变,不满足车辆运动学要求。所以需要进一步平滑产生一条无碰撞且满足车辆动力学约束的轨迹。

首先,根据对车辆的轨迹是前进的轨迹还是倒车的轨迹进行分割,再根据自车的位置,来决定发送哪一条轨迹以及判断是否需要切换轨迹。

然后,以混合 A*和 RS 曲线规划出的无碰撞的可行粗糙轨迹作为 warm start 来输入到 IPOPT 求解器中。将规划问题转化为非线性问题,然后用 IPOPT 求解。

最后,将对偶变量初始化,将极大值问题转化为极小值问题,利于求解,并将二次约束提到目标函数中,成为一个软约束,使得问题转化为二次规划问题,可以利用 OSQP 求解器进行求解。

5 仿真测试与实车验证

5.1 测试车辆介绍

为进一步验证本文提出的路径规划算法的可行性和有效性,在本公司园区及周边停车场进行实验验证。实验平台基于红旗新能源某款轿车改制,车辆参数如表1所示。

表1 车辆参数

| 参数 | 数值 |
|---------------------------|------------|
| 整车质量/kg | 1 890 |
| 整备质量/kg | 1 825 |
| 满载质量/kg | 2 205 |
| 轴距/mm | 2 750 |
| 车长/mm | 4 490 |
| 车宽/mm | 1 874 |
| 车高/mm | 1 613 |
| 后悬/mm | 884 |
| 最小转弯半径/m | 5.5 |
| 最大加速度/(m/s ²) | 3 |
| 最大减速度/(m/s ²) | -6 |
| 最大方向盘转角/(°) | 540 |
| 最大方向盘转速/[(°)/s] | 500 |
| 方向盘/前轮传动比 | 16.18 |
| 车辆型号 | 245/45 R19 |
| 前轮侧偏刚度/[N/(°)] | 99 471×2 |
| 后轮侧偏刚度/[N/(°)] | 99 471×2 |
| 重量分布 | 48.4:51.6 |
| 重心高度/mm | 570 |
| 空气风阻系数 | 0.32 |
| 滚动摩擦系数 | 2.56 |
| 车轮实际直径/m | 0.341 |
| 转弯半径/m | 11.1 |

5.2 仿真实验

本文设计了三种典型的平行泊车场景进行仿真,分别为车位后方有障碍物前方无障碍物且车辆前方通畅(典型场景一)、车位前后均有障碍物车辆前方通畅(典型场景二)和车位前后均有障碍物车辆前方也有障碍物(典型场景三:断头路场景),其中场景一和二定义为简单场景,场景三定义为复杂场景。最后从规划成功与否、规划时间、换挡次数以及是否符合驾驶习惯四方面来验证路径规划算法的合理性。

5.2.1 典型场景一

对典型场景一分别使用几何曲线法和改进混合A*算法进行泊车路径的规划,结果如图8所示,表2为对比两种方法所得规划数据。

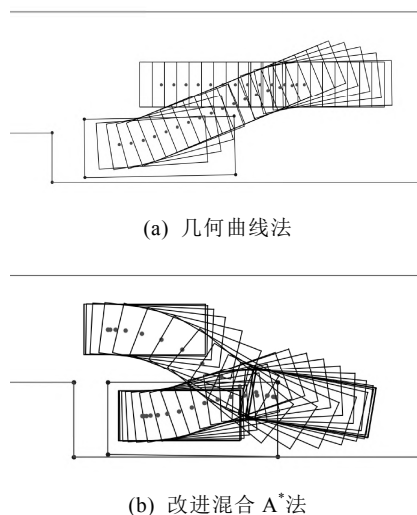


图8 场景一

表2 典型场景一仿真结果

| 使用算法 | 规划成功与否 | 规划时间/ms | 换挡次数 | 是否符合驾驶习惯 |
|--------|--------|---------|------|----------|
| 几何曲线法 | 是 | 78 | 1 | 是 |
| 改进混合A* | 是 | 189.25 | 1 | 否 |

对比上述两种方法所得结果,两种方法都能得到无碰撞的泊车路径,相较于改进混合A*算法,几何曲线法规划时间减少了58.8%,两者换挡次数相同,在第一步车辆前进时改进混合A*车头过于靠近障碍物对路径跟踪精度要求高且不符合驾驶习惯,所以对于典型场景一认为是简单场景用几何曲线法规划的结果。

5.2.2 典型场景二

对典型场景二分别使用几何曲线法和改进混

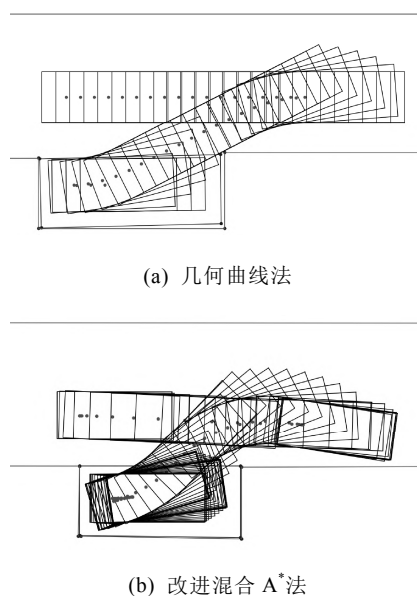


图9 场景二

合 A*算法进行泊车路径的规划,结果如图 9 所示,表 3 为对比两种方法所得规划数据。

表 3 典型场景二仿真结果

| 使用算法 | 规划成功与否 | 规划时间/ms | 换挡次数 | 是否符合驾驶习惯 |
|---------|--------|----------|------|----------|
| 几何曲线法 | 是 | 114 | 2 | 是 |
| 改进混合 A* | 是 | 1 369.14 | 3 | 否 |

对比上述两种方法所得结果,两种方法都能得到无碰撞的泊车路径,相较于改进混合 A*算法,几何曲线法规划时间减少了 91.7%,换挡次数减少了 1 次,在第一步车辆前进时改进混合 A*车头过于靠近障碍物对路径跟踪精度要求高且不符合驾驶习惯,所以对于典型场景二认为是简单场景用几何曲线法规划的结果。

5.2.3 典型场景三

对典型场景三分别使用几何曲线法和改进混合 A*算法进行泊车路径的规划,结果如图 10 所示,表 4 为对比两种方法所得规划数据。

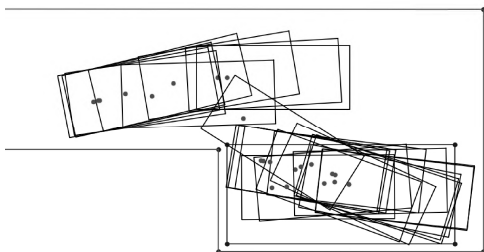


图 10 场景三改进混合 A*法

表 4 典型场景三仿真结果

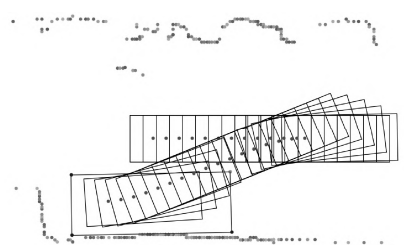
| 使用算法 | 规划成功与否 | 规划时间/ms | 换挡次数 | 是否符合驾驶习惯 |
|---------|--------|----------|------|----------|
| 几何曲线法 | 否 | | | |
| 改进混合 A* | 是 | 11 320.4 | 4 | 是 |

对比上述两种方法所得结果,几何曲线法规划失败,改进混合 A*规划成功且规划时间和换挡次数都在合理范围内,所以对于典型场景三认为是复杂场景在几何曲线法无法规划出路径时用改进混合 A*,增大算法适用范围。

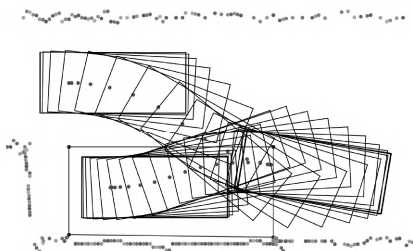
5.3 实车验证

基于测试车辆对上述三种典型的平行泊车场景进行实车验证,所得结果分别如图 11—图 13 所示。

由试验结果可以看出三种典型场景均与仿真结果相同,验证了算法可以有效地减少规划时间,提高规划成功率,扩大算法适用范围。

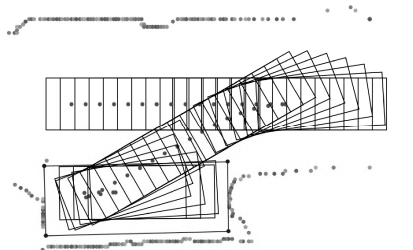


(a) 几何曲线法

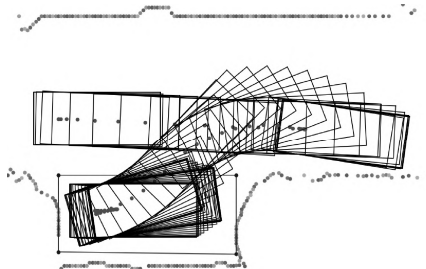


(b) 改进混合 A*法

图 11 场景一实车



(a) 几何曲线法



(b) 改进混合 A*法

图 12 场景二实车

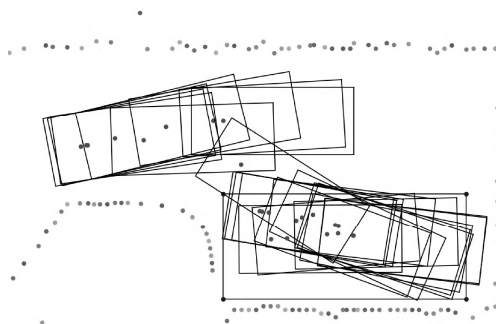


图 13 场景三实车改进混合 A*法

6 结论

本文提出了一种结合几何曲线和改进混合A*的路径规划方法,首先通过场景划分模块来判断场景类型以采用不同的路径规划方法;然后,分别对两种算法进行了设计;最后,对不同场景下两种算法分别进行了仿真和实车试验,验证了算法能够有效的扩大适用范围,增强计算能力,提高平行泊车规划成功率。

综上所述,本文提出的算法确保了在泊车场景较为复杂时的稳定性和安全性。这种方法对之后泊车路径规划领域具有重要意义和广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 孙超,李世杰,张鹏,等.出行系统最优配置下共享停车选择及泊位分配[J].郑州大学学报(工学版),2023,44(1):38-43.
- [2] 张家旭,赵健,施正堂,等.基于回旋曲线的平行泊车路径规划和跟踪控制[J].吉林大学学报(工学版),2020,50(6):2247-2257.
- [3] JHANG J,LIAN F L,HAO Y.Human-like Motion Planning for Autonomous Parking Based on Revised Bidirectional Rapidly-exploring Random Tree* with Reeds-Shepp Curve[J].Asian Journal of Control,2021,23(3):1146-1160.
- [4] 王永胜,罗禹贡,黄晨,等.基于拓扑地图的自主泊车路径协调与优化策略[J].中国公路学报,2021,34(1):177-187.
- [5] 段书用,王启帆,韩旭,等.具有确保安全距离的A*路径优化方法[J].机械工程学报,2020,56(18):205-215.
- [6] 王晓彤.自动泊车系统关键技术研究[D].重庆:重庆大学,2019.
- [7] 任秉韬,王浙浙,邓伟文,等.基于混合A*和可变半径RS曲线的自动泊车路径优化方法[J].中国公路学报,2022,35(7):317-327.
- [8] 曹彦博,颜京才,李旭升,等.基于改进混合A*算法的自动泊车系统路径搜索方法[J].汽车技术,2023(6):37-41.
- [9] 齐尧,徐友春,李华,等.一种基于改进混合A*的智能车路径规划算法[J].军事交通学院学报,2018,20(8):85-90.
- (上接第40页)
- mobile Engineering,2019,233(3):531-547.
- [11] 户亚威.电动客车气压制动响应特性与复合制动控制研究[D].长春:吉林大学,2018.
- [12] 程庆.后驱电动轻卡制动能量回收系统控制研究[D].南京:南京理工大学,2020.
- [13] 王浩.电动汽车制动能量回收控制策略研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2020.
- [14] 蔡承雷,王军,齐志权,等.基于电动商用车EBS的减速度控制策略[C]//中国汽车工程学会.2019 中国汽车工程学会年会论文集(2).北京:中国机械工业出版社,2019:294-299.
- [15] MEI P,KARIMI H R,YANG S,et al.An Adaptive Fuzzy Sliding-mode Control for Regenerative Braking System of Electric Vehicles[J].International Journal of Adaptive Control and Signal Processing,2022,36(2):391-410.
- [16] 范婧,勾鹤,徐晓曦,等.超重型混合动力车辆机电复合制动系统技术[J].车辆与动力技术,2024(1):22-28.
- [17] 王成,田韶鹏,王博.电动汽车电液复合制动系统平顺性控制研究[J].汽车工程学报,2025,15(1):49-58.