

基于新型 CF-RRT* 算法的智能汽车新型 自动泊车路径规划技术

赵闵清¹, 宁善平²

(1. 江铃汽车股份有限公司产品开发技术中心, 江西 南昌 330000;

2. 广东交通职业技术学院, 广东 广州 510650)

摘要: 针对原始 RRT* 自动泊车路径规划算法难以获取平滑、准确及最优路径的问题, 提出一种基于新型 CF-RRT* 算法的自动泊车路径规划算法。首先, 为提升避障安全性, 对环境障碍物进行尺寸膨胀处理, 并根据膨胀后的安全距离进行步长自适应调整; 然后, 为提升路径规划收敛性能, 引入自适应权重修剪策略对冗余节点进行修剪; 最后, 引入三次样条曲线对路径进行平滑处理。仿真试验结果表明: 与原始 RRT* 算法相比, 改进后的新型 CF-RRT* 算法规划出的路径在两种自动泊车场景中不仅可有效实现避障泊车功能, 而且规划时间和路径质量更具有优越性, 可为泊车路径规划技术的发展提供理论依据和技术参考。

关键词: 自动泊车; 路径优化; RRT* 算法; 三次样条曲线; 仿真试验

中图分类号: U463.6

文献标识码: A

The New Automatic Parking Path Planning Technology for Intelligent Vehicles Based on a Novel CF-RRT* Algorithm

ZHAO Mingqing¹, NING Shanping²

(1. Product Development Technology Center, Jiangling Motor Co., Ltd., Nanchang 330000, Jiangxi, China;

2. Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou 510650, Guangdong, China)

Abstract: In response to the difficulty of the original RRT* algorithm in obtaining smooth, accurate, and optimal paths for autonomous parking, this study proposes an automatic parking path planning algorithm based on a novel CF-RRT* algorithm. Firstly, to enhance obstacle avoidance safety, the environment obstacles are subjected to size expansion, and the step size is adaptively adjusted based on the expanded safety distance. Secondly, to improve the convergence performance of path planning, an adaptive weight pruning strategy is introduced to prune redundant nodes. Finally, a cubic spline curve is used to smooth the path. Simulation results demonstrate that compared to the original RRT* algorithm, the improved CF-RRT* algorithm not only effectively achieves obstacle avoidance parking functionality in two automatic parking scenarios but also exhibits superior planning time and path quality. This study can provide theoretical basis and technical references for the development of parking path planning technology.

Key words: automatic parking; path optimization; RRT* algorithm; cubic spline curve; simulation experiment

驾驶员泊车不良容易造成交通拥堵、增加驾驶焦虑, 甚至引发交通事故。自动泊车系统是一种能够代替人工进行泊车操作的高效泊车技术。理想的泊车算法应保证一旦触发自动泊车可行性

触发条件即提供高效无碰撞的平滑泊车路径, 满足安全、舒适、高效、准确的泊车需求。然而, 自动泊车路径优化算法存在内部机制不明确、不确定因素众多等特点, 导致传统路径规划算法容

收稿日期: 2024-01-14

作者简介: 赵闵清, 工程师, 硕士, 研究方向为智能网联汽车

基金项目: 广东省教育厅青年创新人才项目(编号: 2022KQNCX191; 2021KQNCX177)

易陷入局部最优,很难获得令人满意的路径^[1]。为了解决传统自动优化算法中的上述问题,众多研究者对新型路径规划算法及改进策略进行过研究和讨论。例如:熊斌等提出了一种基于轨迹预判的垂直泊车路径规划算法^[2];曹彦博等基于改进混合A*算法提出了一种自动泊车系统路径搜索方法^[3];汪永旺对基于多传感器信息融合的自动泊车系统开展了深入研究^[4]。

基于上述研究基础和启发,本文提出一种新型CF-RRT*算法的智能汽车自动泊车路径规划技术。该技术针对原始RRT*路径曲折、收敛效率低等问题进行改进。主要是在原始RRT*算法基础上通过对障碍物尺寸进行膨胀处理和采用自适应扩展步长调节机制、引入自适应权重修剪策略及三次样条曲线平滑处理等三个方面进行改进。最终,基于两种泊车场景进行仿真实验验证,试验结果表明本文所提出的CF-RRT*算法与原始泊车路径规划算法相比具有优越性。

1 车辆模型与泊车场景的构建

1.1 车辆模型构建

用于研究的车辆的运动学模型是基于转向梯形理论特性构建的,如图1所示。

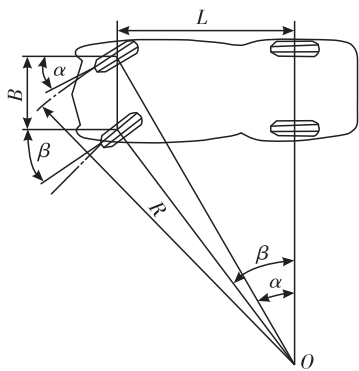


图1 汽车运动转向示意图

研究中将车辆本体视为矩形刚体,泊车车速设置为5 km/h,不考虑车辆地面附着系数及摩擦力、不考虑车轮滑移和滑转。由此车辆转向模型如式(1)所示:

$$\cot\alpha = \cot\beta + B/L \quad (1)$$

其中, α 为外轮转向角, β 为内轮转向角, B 为两侧主销距离, L 为汽车轴距。由此,车辆状态方程可描述为: $S_n = (X_n, Y_n, \alpha_n, \beta_n)$ 。

1.2 自动泊车路径规划系统与场景模型构建

基于上述运动模型及状态方程定义,对自动泊车路径进行规划。自动泊车路径规划是实现智能自动泊车的必要计算环节。智能自动泊车控制系统包括泊车优化数据采集装置、轨道轨迹优化器及其辅助程序、泊车轨道控制器、泊车可行性判定装置、紧急制动器、泊车制动器等^[5]。自动泊车控制系统的具体设计结构图如图2所示。

根据自动泊车路径优化模型,优化目标为最短泊车路径,决策变量为多个泊车位置参考点。在具体运行过程中存在四个约束,分别是:①在泊车过程中,车辆不会与车库边线发生碰撞;②泊车轨迹曲线在划定区域内;③获得泊车路径需平滑;④能够从所收集的位置参考候选点集中选择泊车位置参考点。

自动泊车场景有多种形式,其中垂直泊车和侧方位泊车是最常见的两种,如图3所示。

因此,基于泊车场景特点及约束,具体的自动泊车路径优化模型描述如下:

$$\begin{aligned} \min L &= \int_0^{T_{\max}} v(t) dt \approx \sum_{it=1}^{n_t} \Delta L_{it} \\ S. T. &\begin{cases} LT_{X,Y} = s(p_1, p_2, \dots, p_{is}, \dots, p_{ns}) \\ \Delta L_{it} \leq \Delta L_{\max}, \Delta \angle_{it} \leq \Delta \angle_{\max} \\ \forall p_{is} \in P_C \\ \forall P_g(i) \notin \Omega_{c,it} \\ \forall P_g(i) \in \Omega_g \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

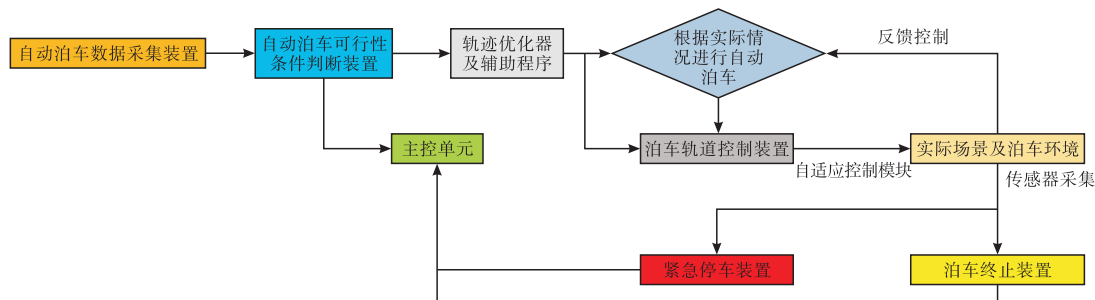
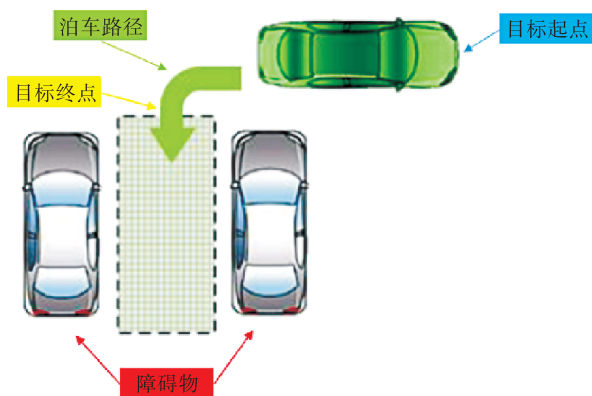
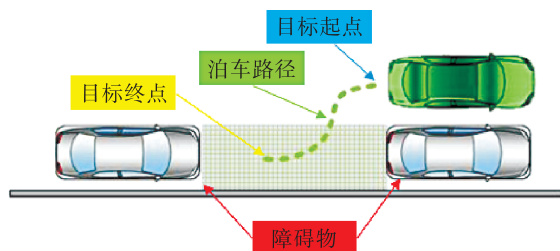


图2 自动泊车控制系统设计结构图



(a) 垂直泊车示意图



(b) 侧方位泊车示意图

图3 智能自动泊车示意图

其中, P_g 是为车库碰撞检测点设置的位置; 集合 P_g 的数目为 n_g ; $P_g(i)$ 是第 i 个车库碰撞检测点的位置, $i \in \{1, 2, \dots, n_g\}$; ΔL_{it} 和 $\Omega_{c,it}$ 是第 i 个时间段泊车间隔距离和车辆覆盖区域; 不同时间段的数量是 $n_{t,it} \in \{1, 2, \dots, n_t\}$; 泊车的结束时间是 $T_{\max} = n_s \Delta t$, $\forall P_g(i) \notin \Omega_{c,it}$ 表征车辆不能接触到车库边缘; L 是泊车路径的长度, 它是关于从泊车开始 0 到泊车结束 $T_{\max}$ 的 t 的定积分泊车速度 $v(t)$, 近似等于所有时间段的泊车间隔距离的总和; $\Delta \angle_{it}$ 为第 i 个时间段泊车姿态角, $\Delta L_{\max}$ 和 $\Delta \angle_{\max}$ 是任意允许时间段内泊车间隔距离和泊车姿态角的最大值; $LT_{X,Y}$ 是由 X 轴和 Y 轴组成的平面坐标系中的泊车轨迹; $\{p_1, p_2, \dots, p_{is}, \dots, p_{ns}\}$ 是泊车位置参考点集。

2 新型 CF-RRT* 算法

快速搜索随机树算法 (rapid-exploration random tree, RRT) 可用于解决计算复杂的高维规划问题, 但只能快速求出可行地路径而不能保证路径的质量, 由此, 在原有基础之上提出 RRT* 算法^[6]。RRT* 算法采用渐进优化的思想, 在原始 RRT 算法基础上引入重新父节点和重新布线两个优化过程, 减小了算法规划计算代价, 其主要特征是快速找到初始路径, 通过不断迭代优化直至抵达目标点。但随着采样点的大量增加,

RRT* 算法存在路径收敛效率不佳、路径质量不高的突出问题。为此, 本文在原始 RRT* 的基础之上提出了 CF-RRT* 算法, 旨在解决算法上述缺陷, 改善算法路径规划质量。

2.1 迭代步长自适应调整策略及障碍物尺寸膨胀处理

为提升安全性, 对障碍物进行尺寸膨胀处理, 膨胀尺寸比例为 10%。此外, 为了提升随机树扩展过程中的搜索效率, 定义了不同的安全距离及不同的扩展步长。当安全距离较大时可以选择较大的扩展步长, 当安全距离较小时动态选择较小的扩展步长, 迭代步长自适应调整策略如式 (3) 所示。

$$\Delta d = \begin{cases} d_1, s \in [0, s_1) \\ d_2, s \in [s_1, s_2) \\ d_3, s \in [s_2, s_3) \\ d_4, s \in [s_3, +\infty) \end{cases} \quad (3)$$

其中, d_1, d_2, d_3, d_4 为不同设置迭代步长, s 用于表征当前位置的最小安全距离。

2.2 自适应权重修剪策略

传统 RRT* 算法的路径节点通常非常离散, 同时具有大量无效节点, 影响算法路径规划效率。为进一步改善算法性能, 本文在传统 RRT* 算法基础上引入自适应权重修剪策略对随机树冗余节点进行修剪处理。主要是通过对采样点随机树扩展方向分配自适应权重, 权重将随算法的迭代进程不断变化, 使得新扩展的节点方向不单独由采样点决定, 而是由采样点和目标点之间的位置关系共同决定, 从而减少冗余节点数量, 增强扩展的方向性, 进而加快随机数搜索效率。剪枝公式如式 (4) 所示^[7]:

$$Q = \begin{cases} (X_{\text{rand}} - X_{\text{near}}) \times w / \Delta d + X_{\text{near}} \\ (X_{\text{goal}} - X_{\text{near}}) \times (1 - w) / \Delta d + X_{\text{near}} \end{cases} \quad (4)$$

其中, X_{goal} 为目标节点, X_{rand} 为随机采样点, X_{near} 为邻近节点, Δd 为式中定义的安全距离, w 为权重大小, 其目的是使得探索性和绕路性之间可以进行平衡。通常情况下, w 的取值可根据实际情况进行调节。但是在实际应用中, 需要考虑到复杂环境下的自适应调节问题, 本文采用的权重调节函数如式 (5) 所示:

$$w = \frac{k}{\log(N + 1)} \quad (5)$$

其中, k 是控制绕路属性的系数, N 是已经生成的节点数。这个公式中使用了对数函数, 使

得节点数的增加对权重的影响逐渐降低。随着节点数的增加,权重会逐渐趋于稳定,从而在探索性和绕路性之间进行更精细的权衡。

通过这个公式,初始阶段的探索性较强,随着节点的增加,绕路性逐渐增加,探索性逐渐减小。这样可以在路径规划过程中,尽可能地探索未知区域,同时保持路径的合理性和效率。

2.3 三次样条曲线平滑处理

样条曲线最初是工程设计中使用的绘图工具,用于描述飞机或船舶制造过程中的平滑形状曲线^[8]。当三次样条插值曲线满足以下2个条件时,三次样条曲线将会是一条光滑平整的曲线:

条件1:在任意子区间 $[x_i, x_{i+1}]$ 中,索引 $i \in [0, 1, 2, \dots, n]$, $s(x)$ 是三次多项式。具体公式描述如式(6)所示:

$$s(x) = \begin{cases} s_1(x) = d_1x^3 + c_1x^2 + b_1x + a_1x \in [x_0, x_1] \\ s_1(x) = d_1x^3 + c_1x^2 + b_1x + a_1x \in [x_1, x_2] \\ \dots \\ s_1(x) = d_nx^3 + c_nx^2 + b_nx + a_nx \in [x_{n-1}, x_n] \end{cases} \quad (6)$$

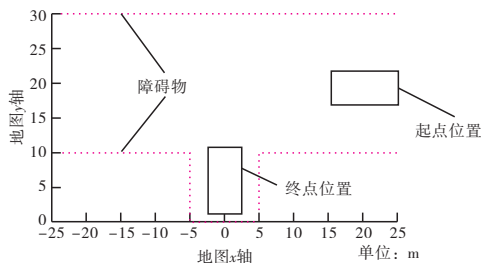
其中 $(x_0, x_1, \dots, x_n)$ 为插值点; $(a_0, a_1, \dots, a_n)$, $(b_0, b_1, \dots, b_n)$, $(c_0, c_1, \dots, c_n)$ 和 $(d_0, d_1, \dots, d_n)$ 是三次样条插值分段函数的多项式系数。

条件2:在 $\Delta = [a, b]$ 区间内, $s(x)$ 及其导数函数 $s'(x)$ 是连续的。

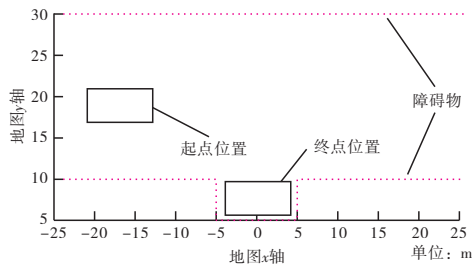
本文在传统 RRT* 算法基础上采用三次样条曲线的路径平滑方法,对规划轨迹进行路径点插值处理,进而得到更加连续且光滑的路径,保证了车辆在实际运动过程中的连续性和稳定性。

3 自动泊车仿真模拟试验

仿真验证环境分为垂直车位和侧方位车位2种环境,如图4所示,虚线为障碍物。本文将比较改进前后的算法在垂直入库和侧方位泊车时的搜索时长、路径拐点和路径节点搜索情况。



(a) 垂直泊车位



(b) 侧方位车位

图4 自动泊车仿真环境示意图

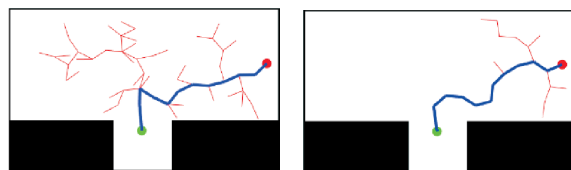
设定仿真模拟试验初始参数如表1所示,采用原始 RRT 算法、原始 RRT* 算法和本文提出的新型 CF-RRT* 路径规划算法对泊车路径优化方法进行比较^[9]。

表1 仿真试验初始参数表

类型	垂直泊车仿真试验		侧方位泊车仿真试验	
	起点	终点	起点	终点
原始 RRT 算法	(25, 20)	(0, 10)	(-15, 20)	(5, 7)
原始 RRT* 算法	(25, 20)	(0, 10)	(-15, 20)	(5, 7)
CF-RRT* 算法	(25, 20)	(0, 10)	(-15, 20)	(5, 7)

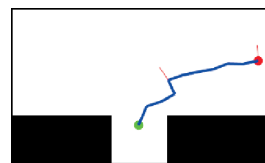
3.1 垂直车位泊车仿真试验

垂直泊车入库是大部分泊车时要遇到的场景,且通常困难的情况是一个空车位两旁的车位都被占用,本文对该情况开展模拟仿真试验。垂直入库实验仿真试验结果如图5所示。



(a) 原始 RRT 算法

(b) 原始 RRT* 算法



(c) CF-RRT* 算法

图5 垂直泊车仿真试验结果对比图

分析图5可知,原始 RRT 算法冗余节点及分支数较多,表明其路径规划效率较低且路径存在较多转角倒车的情况。这种算法虽然符合基本避碰和入库要求,但是改变方向的实际代价很高。原始 RRT* 算法虽然在原有基础上有所改善,但依然存在一些无效节点和拐角情况。而本文提出的新型 CF-RRT* 算法由于引入了自适应权重修剪策略,路径规划过程中的冗余节点大幅减少,

同时由于引入迭代步长的自适应调整策略和路径平滑处理,大幅度减少了路径的拐角次数,降低了泊车代价,提升了算法效率。

为进一步说明算法优越性,本文进行200次垂直自动泊车入库计算,结果如表2所示。根据结果可知:新型CF-RRT*算法与原始RRT*算法相比,平均时间、平均拐点次数、平均节点数分别提升25.552%、32.375%、41.788%。

表2 垂直自动泊车试验统计结果表

算法类型	平均时间/s	平均拐点次数/次	平均节点数/个
原始RRT算法	13.8796	7.7891	14.2874
原始RRT*算法	11.4732	5.1345	11.9842
CF-RRT*算法	8.5415	3.4722	6.9762
提升比例/%	25.552	32.375	41.788

注:提升比例指CF-RRT*算法与原始RRT*算法相比的提升比例。

3.2 侧方位泊车仿真试验

侧方位泊车通常是在道路旁泊车。本文同样采用原始RRT算法、原始RRT*算法和本文提出的新型CF-RRT*路径规划算法进行路径规划仿真模拟实验,侧方位自动泊车仿真模拟实验结果见图6。由图6同样可知,新型CF-RRT*算法在泊车拐角次数、节点数以及冗余节点方面均显著优于原始RRT*算法和RRT算法。

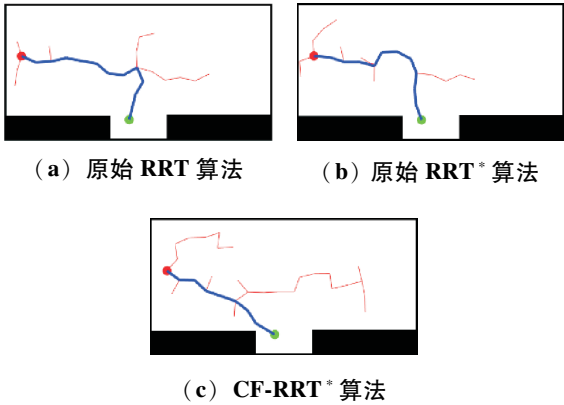


图6 侧方位泊车仿真试验结果对比图

对侧方位自动泊车入库进行200次仿真模拟实验,结果如表3所示。根据结果可知:新型CF-RRT*算法与原始RRT*算法相比,平均时间、平均拐点次数、平均节点数分别提升16.008%、47.606%、35.499%。

4 结论

本文针对原始RRT*路径规划算法存在的路径不平滑、不准确、效率较低等缺陷,提出一种新型CF-RRT*算法用于提升智能汽车自动泊车路

表3 侧方位自动泊车试验统计结果表

算法类型	平均时间/s	平均拐点次数/次	平均节点数/个
原始RRT算法	14.9815	7.9814	15.9135
原始RRT*算法	8.8715	5.8642	13.4217
CF-RRT*算法	7.4513	3.0725	8.6571
提升比例/%	16.008	47.606	35.499

注:提升比例指CF-RRT*算法与原始RRT*算法相比的提升比例。

径技术计算效率和准确性,有效降低了自动泊车过程中的行驶代价。首先,本文建立了车辆和泊车场景模型,并根据自动泊车场景建立了以泊车时间最短为优化目标的数学模型。然后,针对原始RRT*算法路径计算效率差、行驶效率低等缺陷,从采用迭代步长自适应调整策略和障碍物尺寸膨胀处理、引入自适应权重修剪策略以及采用三次样条曲线平滑处理等三个方面对原始RRT*算法进行改进,提出了一种新型CF-RRT*算法,该算法具有更优的迭代效率和求解质量,并将其用于求解上述优化路径规划模型。最终,根据垂直和侧方位停车位仿真试验结果统计可得:新型CF-RRT*算法与原始RRT*算法相比,在垂直停车位试验和侧方位停车位仿真试验中,平均时间、平均拐点次数、平均节点数均有显著提升。

参考文献:

[1]姜涛,周兴阁,陈宇.基于RRT*算法和DWA算法的分层结构路径规划策略.计算机测量与控制,2024(1):1-9.

[2]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.

[3]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.

[4]汪永旺.基于多传感器信息融合的自动泊车系统研究[D].芜湖:安徽工程大学,2023.

[5]YAN C, YEWANG Q. Improved particle swarm optimization algorithm for automatic entering parking space based on spline theory[C]. In proceedings of the 2nd international conference on computing and data science (CONF-CDS 2021), 2021(28):136-143.

[6]姚智龙,张小俊,王金刚.改进Bi-RRT*算法的自动泊车路径规划[J].机械科学与技术,2024,43(6):1063-1071.

[7]骆海涛,孙嘉泽,高鹏宇,等.基于改进RRT*算法的智能轮椅全局路径规划研究[J].仪器仪表学报,2023,44(10):303-313.

[8]CHEN Y, WANG L, LIU G, et. al. Automatic parking path optimization based on immune moth flame algorithm for intelligent vehicles[J]. Symmetry, 2022(14):1923.

[9]王启明,宗高强,胥津铭.多段式自动泊车最优路径规划与仿真分析[J].系统仿真学报,2022,2(34):385-395.