

基于梯形规划曲线的智能车速度规划算法研究

曹波¹ 李永乐² 朱英杰¹ 贾斌² 徐友春²

(陆军军事交通学院学员五大队 天津 300161)¹ (陆军军事交通学院军事交通运输研究所 天津 300161)²

摘要 针对 QP(Quadratic Programming)算法应用于智能车速度规划时,存在停车过程减速较晚而导致减速距离短、平稳性差的问题,文中提出了基于梯形规划曲线的智能车速度规划算法。首先建立速度规划的 QP 模型并求解;然后分析不同初速度下基于梯形规划曲线的停车过程,将其结果作为非线性约束来实例化 QP 模型并再次求解;最后通过仿真实验和实车实验对比分析 QP 算法和所提算法的实验结果。仿真实验中,分别以 39.8 km/h,31.5 km/h,20.6 km/h 的初速度进入停车过程,速度变化曲线表明所提算法能够将减速开始时间提前,初步表明该算法具有优化效果;实车实验中,较 QP 算法而言,所提算法将 3 种初速度下的停车过程分别提前 5.9 s,5.0 s,3.7 s,平均加速度绝对值分别减少 0.5 m/s²,0.5 m/s²,0.4 m/s²,最大加速度绝对值分别减少 0.16 m/s²,0.33 m/s²,0.35 m/s²。仿真实验和实车实验表明,所提算法的改进效果明显,具有显著的优化作用。

关键词 智能车,速度规划,QP 算法,梯形规划曲线

中图分类号 TP242 文献标识码 A DOI 10.11896/jsjcx.190400147

Research on Intelligent Vehicle Speed Planning Algorithms Based on Trapezoidal Planning Curve

CAO Bo¹ LI Yong-le² ZHU Ying-jie¹ JIA Bin² XU You-chun²

(Student Brigade 5, Army Military Transportation University, Tianjin 300161, China)¹

(Military Transportation Research Institute, Army Military Transportation University, Tianjin 300161, China)²

Abstract Aiming at the problem of short deceleration distance and poor stationarity caused by late deceleration in parking process when QP (quadratic programming) algorithm is applied to speed planning of intelligent vehicles, there are some problems such as short deceleration distance and poor stationarity caused by late deceleration in the stopping process. This paper presented an intelligent vehicle speed planning algorithm based on the trapezoidal programming curve. Firstly, the QP model of speed planning is established and solved. Then, the stopping process based on trapezoidal programming curve at different initial speeds is analyzed, and its results are considered as nonlinear constraint to instantiate and solved QP model. Finally, the experimental results of QP algorithm and the algorithm were compared and analyzed through simulation experiment and real car experiment. In the simulation experiment, the initial speed of 39.8 km/h, 31.5 km/h and 20.6 km/h was used to enter the parking process respectively. The speed curve shows that the proposed algorithm can advance the deceleration time, which preliminarily shows that the algorithm has the optimization effect. In the real vehicle experiment, compared with QP algorithm, the proposed algorithm advances the parking process of the three initial speed by 5.9 s, 5.0 s and 3.7 s, the absolute value of the average acceleration decreases by 0.5 m/s², 0.5 m/s² and 0.4 m/s², the absolute value of the maximum acceleration decreases respectively by 0.16 m/s², 0.33 m/s² and 0.35 m/s². The simulation and real vehicle experiments show that the improved method has obvious improvement effect and significant optimization effect.

Keywords Intelligent vehicle, Speed planning, QP algorithm, Trapezoidal planning curve

1 引言

速度规划是智能车运动规划^[1]的重要组成部分,是影响智能车纵向行驶安全和乘坐舒适性的关键因素^[2]。Jorge 等^[3]提出了一种非结构化道路环境下基于平滑路径的速度规

划方法,该方法能获得具有较好舒适性的速度和加速度曲线,但需要进一步考虑时间因素。姜岩等^[4]在保证横向安全性的同时,基于动力学约束进行纵向规划,实现平顺地加速和制动,并保证了纵向安全性和侧向稳定性,但该算法只能适用于简单城市环境并且要求时速在 40 km/h 以内。

收稿日期:2019-04-26 返修日期:2019-07-07 本文受国家重点研发计划项目(2016YFB0100903)资助。

曹波(1994-),男,硕士生,主要研究方向为智能车运动规划,E-mail:1509968341@qq.com;李永乐(1984-),男,工程师,主要研究方向为计算机视觉,E-mail:liyongle1984@163.com(通信作者);朱英杰(1993-),男,硕士生,主要研究方向为智能车运动规划;贾斌(1962-),男,教授,主要研究方向为交通运输信息技术;徐友春(1972-),男,教授,主要研究方向为智能车环境感知。

二次规划^[5]是一类非线性规划问题,主要用于最小二乘问题求解、非线性优化等问题。赵敏等^[6]提出了基于信赖域二次规划(SQP)将非线性规划转换为一系列二次子规划求解,降低了算法复杂度,其通过数字仿真验证了算法的有效性。Brand等^[7]针对二次规划的求解问题,提出了一种具有并行性的迭代算法,给出并证明了并行二次规划算法收敛性的条件,在保证精度的前提下大大提高了运算速度。Matlab仿真实验表明,较传统方法而言,该方法能将求解速度提升5~10倍。

Villagra等^[3]提出了一种非结构化道路环境下的基于平滑路径的自动公交车速度规划方法,该方法同时考虑了横纵向加速度和加速度变化率对舒适性的影响,以确定最优速度变化曲线。该方法能获得具有较好舒适性的速度和加速度曲线,但需要进一步考虑时间因素。Zeng等^[8]针对包含若干停车标志、交通信号灯、弯道及不同坡度、限速道路环境下的速度规划问题,采用动态规划(DP)的方法求解智能车沿给定路线自动驾驶的最优速度。仿真研究表明,在不考虑障碍的前提下,该规划方法能够节约19%的能量。

文献[9-10]基于车辆当前位置的纵向速度规划,在无障碍时以环境允许的最大行驶速度为期望速度;当遇到障碍时,根据车辆与障碍物的相对距离和期望减速度规划速度曲线,在障碍后方安全距离内停车。该方法已被成功应用于 DARPA 挑战赛。姜岩等^[11]在此基础上提出了梯形速度规划方法,并引入横向动力学约束对车速进行限制,在只存在静态障碍物时具有较好的规划效果,提高了车辆行驶的安全性和舒适性。

针对上述问题,本文首先建立智能车速度规划的QP模型并对其进行求解,然后针对停车过程中QP算法的规划结果存在减速较晚导致减速距离短、舒适性较差的问题,提出了基于梯形规划曲线的规划算法,以解决智能车停车过程中的速度规划问题。本文通过实验对比了不同初速度下的仿真数据和实车实验的数据,证明了算法的有效性。

2 速度规划QP模型

2.1 ST图概述

路径规划的结果是一条包含若干位姿点的无碰撞路径,在此基础上进行速度规划而赋予位姿点时间属性和速度值,可将执行路径转换为可执行轨迹^[4]。由此可见,速度规划研究的内容是速度与时间之间的二维关系;此外,进行速度规划还需要描述障碍物与智能车之间的相对位置关系。

为了有效而简洁地描述智能车与障碍物的相对关系及智能车自身速度与时间之间的关系,本文建立了ST图。ST图即路径-时间图,首先基于智能车的当前位置和行驶轨迹建立坐标系——S-T坐标系,然后依次将障碍物相对于智能车的位置信息及智能车自身的位置信息投影至坐标系中。如图1所示,智能车沿轨迹S行驶,动态障碍(以障碍车为例)在 t_0 至 t_1 期间行驶至轨迹 s_0 与 s_1 之间。由此建立的ST图如图2所示,图中绿色曲线为智能车基于规划结果的运动状态,黄色区域为预测的障碍车运动状态。

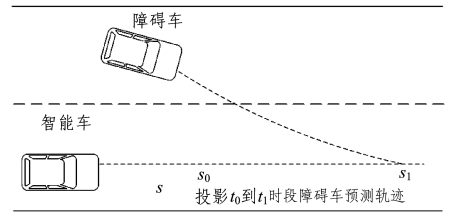


图1 智能车当前位置和行驶轨迹场景

Fig. 1 Current position and trajectory scene of intelligent vehicle

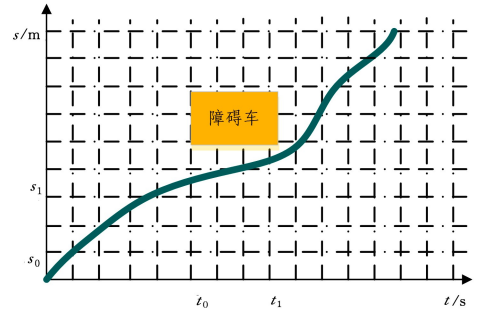


图2 智能车当前位置和行驶轨迹ST图(电子版为彩色)

Fig. 2 ST figure of current position and trajectory of intelligent vehicle

2.2 QP模型建立

Piazzini等^[12]证明了5次样条曲线的输出量连续平滑,因此本文采用5次多项式曲线作为速度生成方法,单次规划总时长为 T ,时间步长为 Δt ,采样点个数为 $m = T/\Delta t$ 。将速度曲线按照时长均分为 $K(K = m/n, n = 1, 2, \dots)$ 条子曲线,即:

$$\varphi_k(t) = \sum_{i=0}^5 u_{i,k} \times t^i, k \in [1, K] \quad (1)$$

其中, $u_{i,k}$ 为曲线系数。令:

$$\mathbf{M}_k = [u_{k,0}, u_{k,1}, u_{k,2}, u_{k,3}, u_{k,4}, u_{k,5}]^T, k \in [1, K]$$

$$\mathbf{T}_{k,j} = [1, t_{k,j}, t_{k,j}^2, t_{k,j}^3, t_{k,j}^4, t_{k,j}^5], j \in [0, T/(\Delta t K) - 1]$$

解出式(1)中各未知系数便可求得规划时长内的速度曲线。具体求解过程包括构建目标函数、设计约束条件和求解最优速度3个步骤。

2.2.1 构建目标函数

以代价函数为目标函数,其中代价指各影响因素量化值与权值的乘积之和,最小代价对应的状态即为规划结果。其中目标函数为:

$$C_1(t) = \sum_{k=1}^K \left(\int_{(k-1)T/(\Delta t K)}^{kT/(\Delta t K)} (\epsilon_1 (\dot{\varphi}_k(t))^2 + \epsilon_2 (\ddot{\varphi}_k(t))^2 + \epsilon_3 (\dddot{\varphi}_k(t))^2) dt \right) \quad (2)$$

$$C_2(t) = \sum_{k=1}^K \left(\int_{(k-1)T/(\Delta t K)}^{kT/(\Delta t K)} ((\dot{\varphi}_k(t) - V_i)^2) dt \right) \quad (3)$$

其中, ϵ_1 为速度权重, ϵ_2 为加速度权重, ϵ_3 为加速度变化率权重, V_i 为期望速度。总代价为:

$$C = \sum_{k=1}^K \left(\left(\frac{1}{2} (\mathbf{M}_k)^T \cdot \mathbf{H}_1 \cdot \mathbf{M}_k + 2 \cdot (\mathbf{M}_k)^T \cdot \mathbf{H}_2 \cdot \mathbf{M}_k + (\mathbf{M}_k)^T \cdot \mathbf{H}_3 \cdot \mathbf{M}_k \right) + \mathbf{N}_k \cdot \mathbf{M}_k \right) \quad (4)$$

其中, $\mathbf{N}_k = [\sigma_{0,k}, \sigma_{1,k}, \sigma_{2,k}, \sigma_{3,k}, \sigma_{4,k}, \sigma_{5,k}]$ 是随子曲线期望速度变化而变化的行向量。令 $t_c = T/(\Delta t K)$,对式(1)分别取一阶导、二阶导和三阶导求得 $\dot{\varphi}_k(t)$, $\ddot{\varphi}_k(t)$ 和 $\dddot{\varphi}_k(t)$,将其代入式(2)、式(3)并求和即可得到式(4),其中 \mathbf{H}_1 , \mathbf{H}_2 和 \mathbf{H}_3 分别为:

$$H_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_e & t_e^2 & t_e^3 & t_e^4 & t_e^5 \\ 0 & t_e^2 & \frac{4}{3}t_e^3 & \frac{3}{2}t_e^4 & \frac{8}{5}t_e^5 & \frac{5}{3}t_e^6 \\ 0 & t_e^3 & \frac{3}{2}t_e^4 & \frac{9}{5}t_e^5 & 2t_e^6 & \frac{15}{7}t_e^7 \\ 0 & t_e^4 & \frac{8}{5}t_e^5 & 2t_e^6 & \frac{16}{7}t_e^7 & \frac{5}{2}t_e^8 \\ 0 & t_e^5 & \frac{5}{3}t_e^6 & \frac{15}{7}t_e^7 & \frac{5}{2}t_e^8 & \frac{25}{9}t_e^9 \end{pmatrix}$$

$$H_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4t_e & 6t_e^2 & 8t_e^3 & 10t_e^4 \\ 0 & 0 & 6t_e^2 & 12t_e^3 & 18t_e^4 & 24t_e^5 \\ 0 & 0 & 8t_e^3 & 18t_e^4 & \frac{144}{5}t_e^5 & 40t_e^6 \\ 0 & 0 & 10t_e^4 & 24t_e^5 & 40t_e^6 & \frac{400}{7}t_e^7 \end{pmatrix}$$

$$H_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 36t_e & 72t_e^2 & 120t_e^3 \\ 0 & 0 & 0 & 72t_e^2 & 192t_e^3 & 360t_e^4 \\ 0 & 0 & 0 & 120t_e^3 & 360t_e^4 & 720t_e^5 \end{pmatrix}$$

2.2.2 设计约束条件

为保证行驶的安全性和舒适性,智能车状态输入量 $E =$

$[s_0, v_0, a_0]^T$ 和输出量 $P = [\varphi_k(t), \dot{\varphi}_k(t), \ddot{\varphi}_k(t)]^T$ 应满足:

$$\begin{cases} P_0 = E \\ |T_{k,t_0} - T_{k,t_1}| \cdot M_k < 0 \\ s \min_{k,j} > T_{k,j} \cdot M_k \\ s \max_{k,j} < T_{k,j} \cdot M_k \\ \exists \dot{\varphi}_k(t) < v_{\max} \end{cases}$$

其中, v_{\max} 为由道路环境决定的期望速度^[13-14], $s \min$ 和 $s \max$ 为某时刻障碍物信息投影至 ST 的最大和最小 S 值。

2.2.3 求解最优速度

函数库 qpOASES^[15] 是一个开源的 C++ 函数库, 主要用于处理二次规划最优解的求解问题, 本文利用 qpOASES 库求解满足约束的最优解。

至此, 已经求出式(1)中系数 $u_{i,k}$ 的值, 即获得了未来时长 T 内的行驶速度。

3 基于梯形规划曲线的速度规划算法

3.1 问题描述

根据 2.2 节构建的代价函数, 速度、加速度的变化会导致代价值增加。基于 QP 算法规划时, 智能车的速度、加速度是尽量恒定的; 而停车过程必定有减速(或先加速后减速)过程, 但减速时机的选择是不定的。因此, 基于 QP 算法规划的停车过程中减速较晚、减速距离较短, 从而导致如下问题: 1) 停车距离较短导致减速度较大, 低速情况下, 乘客对车辆速度变化更加敏感, 较小的减速度就可能引起不舒适性, 智能车舒适性将受到影响; 2) 低速情况下智能车纵向跟踪的难度比高速

情况下的大, 较短的停车距离会让车速变化较大, 增加纵向跟踪难度, 甚至会导致智能车无法精准停车。因此, 需要对停车过程中的速度规划算法进行改进。

3.2 算法实现

梯形规划曲线假设智能车尽量以期望速度匀速行驶且变速过程中加速度恒定^[16]。规划过程中, 首先令初始速度为 v , 再根据宏观路径判断能否加速至最高速度, 最后确定加速和减速的位置从而得到规划结果。其详细流程如图 3 所示。

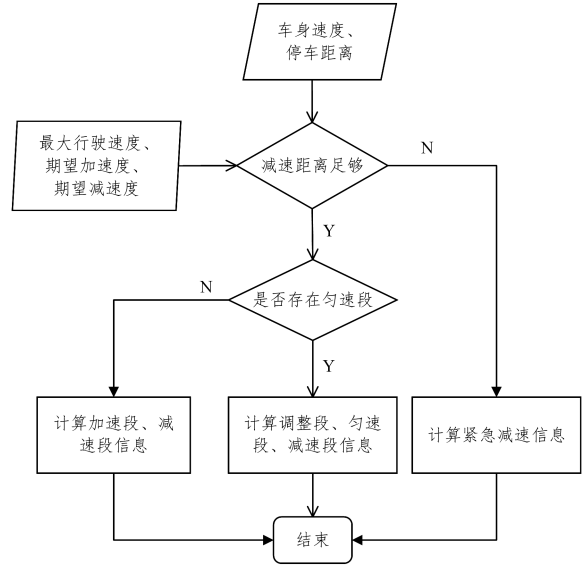


图 3 梯形速度规划流程图

Fig. 3 Trapezoidal velocity planning flow chart

如图 4 所示, 假设智能车根据环境信息作出在距车 S 处停车的决策, 即速度降为 0。为保证行驶安全和舒适性, 假设期望速度为 V_{\max} , 期望加速度为 a_u , 期望减速度为 a_d (绝对值)。

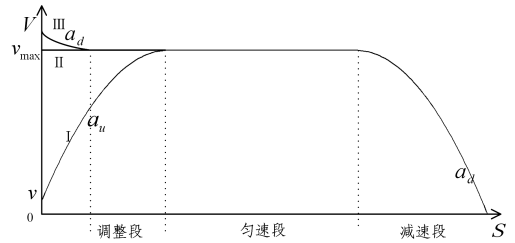


图 4 梯形速度规划示意图

Fig. 4 Trapezoidal velocity planning diagram

当 S 足够长时(根据本文需要解决的问题, 暂不研究 S 太短导致紧急刹车的情况), 智能车经历匀速行驶和减速行驶阶段后在 S 处停车。减速段行驶距离为:

$$S_d = \frac{V_{\max}^2}{2a_d}$$

根据初速度, 调整段分为 3 种情况。

1) $v < v_{\max}$, 调整段加速行驶, 加速行驶距离为:

$$S_u = \frac{V_{\max}^2 - v^2}{2a_u}$$

2) $v = v_{\max}$, 调整段匀速行驶。

3) $v > v_{\max}$, 调整段减速行驶, 行驶距离为:

$$S_u = \frac{v^2 - V_{\max}^2}{2a_d}$$

匀速行驶的距离为:

$$S_c = S - S_d - S_u - l$$

其中, l 为智能车定位点与车头的距离^[17]。

当 $v < v_{max}$ 且 $S - l < S_d + S_u$ 时, 不存在匀速段, 规划示意图如图 5 所示。拐点速度为:

$$v_p = \sqrt{(2a_u a_d (S - l) + v^2 a_d) / (a_u + a_d)}$$

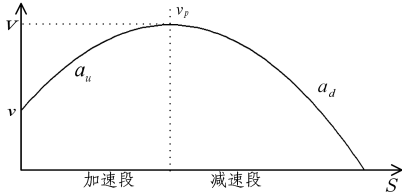


图 5 不存在匀速段的规划示意图

Fig. 5 Planning diagram without uniform velocity section

梯形规划曲线在静态环境下具有良好的速度规划效果, 能够有效解决 2.1 节所述问题, 因此本文将根据梯形规划曲线求得的速度值作为 QP 算法的非线性约束, 优化取值范围, 以解决其存在的问题。

4 实验结果分析

4.1 仿真结果与分析

4.1.1 仿真平台

本文首先利用仿真平台对本文算法的有效性进行分析, 仿真采用 C++ 语言编程实现, 仿真界面如图 6 所示。仿真系统能够自行修改车辆模型、位姿信息, 也可根据需要设置目的地和路线, 并接入规划、控制等模块信息来仿真智能车完成自动驾驶的全过程。

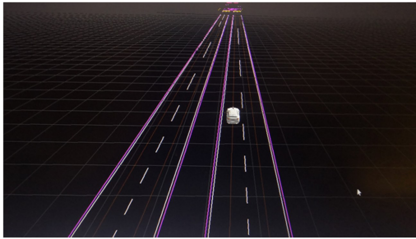


图 6 仿真系统界面图

Fig. 6 Interface figure of simulation system

4.1.2 仿真结果及分析

仿真实验中, QP 算法和本文算法求解速度所需参数的含义及其取值如表 1 所列。仿真实验设置期望速度为 40 km/h, 仿真车辆在距终点 140 m 处作出到达终点的停车决策。

表 1 各个参数及取值

Table 1 Parameters and values

参数	取值
规划时长/s	7.0
时间步长/s	0.02
期望速度 v_{max} /(km/h)	40
最小速度 v_{min} /(km/h)	0
速度权重 ϵ_1	100
加速度权重 ϵ_2	1000
加速度变化率权重 ϵ_3	2000
停车决策距离 S/m	140
期望加速度 a_u /(m/s ²)	0.6
期望减速度 a_d /(m/s ²)	0.6

仿真过程中, 为分析不同初速度情况下的规划结果, 拟分别以 40 km/h, 30 km/h, 20 km/h 的初速度到达停车决策点而进入停车状态。实际仿真过程中, 实际到达停车决策点的初速度为 39.8 km/h, 31.5 km/h, 20.6 km/h, 使用 QP 算法和本文算法的停车过程的速度变化如图 7—图 9 所示。

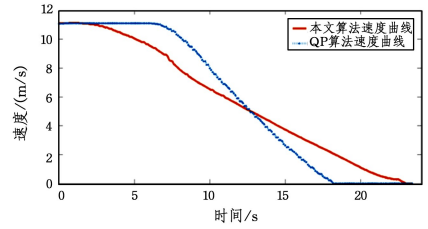


图 7 初速 39.8 km/h 的速度变化曲线

Fig. 7 Velocity change curve of initial speed 39.8 km/h

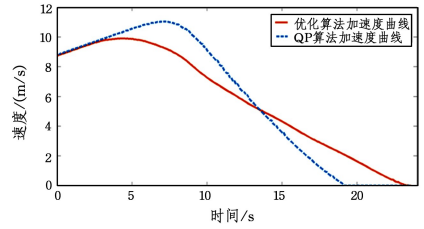


图 8 初速 31.5 km/h 的速度变化曲线

Fig. 8 Velocity change curve of initial speed 31.5 km/h

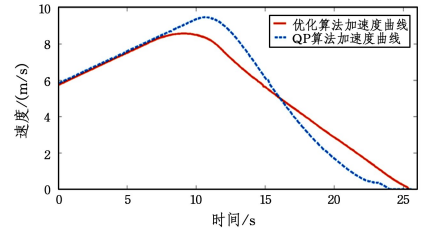


图 9 初速 20.6 km/h 的速度变化曲线

Fig. 9 Velocity change curve of initial speed 20.6 km/h

图 7 中, 39.8 km/h (11.05 m/s) 时速下达到停车决策点后, 车辆几乎达到期望速度, 不能继续加速。QP 算法是先匀速后减速行驶直至停车, 而本文算法是直接减速行驶至停车。图 8 中, 31.5 km/h (8.75 m/s) 时速下达到停车决策点后, QP 算法先加速至 11.03 m/s 后减速行驶至停车, 而本文算法先加速至 9.89 m/s 后减速行驶至停车。图 9 中, 20 km/h (5.56 m/s) 时速下达到停车决策点后, QP 算法先加速至 9.46 m/s 后减速行驶至停车, 而本文算法先加速至 8.56 m/s 后减速行驶至停车。

仿真结果表明: 停车过程中, 较 QP 算法而言, 本文方法能够将智能车停车过程提前, 初步表明本文算法具有优化效果。

4.2 实车实验与分析

4.2.1 实车实验平台

实验平台基于自主研发的智能车 (见图 10)。平台主要搭载了 GPS/IMU 组合惯导、Velodyne64 线激光雷达、毫米波雷达和摄像头等传感器, 为智能车提供定位和环境感知数据。车辆相关参数如表 2 所列。



图 10 实验平台

Fig. 10 Experimental platform

表 2 车辆参数

Table 2 Vehicle parameters

参数	数值
最大行驶速度/(km/h)	205
最小百公里加速时间/s	9.8
最小转弯半径/m	8.887
平台尺寸/mm ³	4765 * 1931 * 1655

4.2.2 结果分析

实车实验时,参数设置与仿真实验相同,由于底层执行时间的影响,到达停车决策点的初速度分别为 39.5 km/h, 31.1 km/h 和 20.4 km/h。经过 17 次相同条件下的测试,获得了 3 种条件下智能车底层执行的加速度变化曲线,如图 11—图 13 所示。

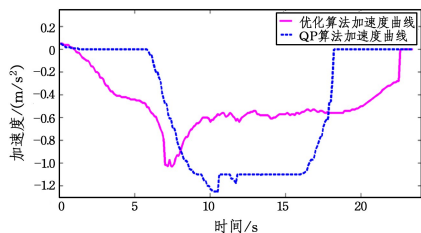


图 11 初速 39.5 km/h 的加速度变化曲线

Fig. 11 Acceleration change curve of initial speed 39.5 km/h

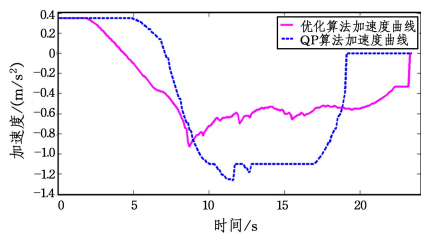


图 12 初速 31.1 km/h 的加速度变化曲线

Fig. 12 Acceleration change curve of initial speed 31.1 km/h

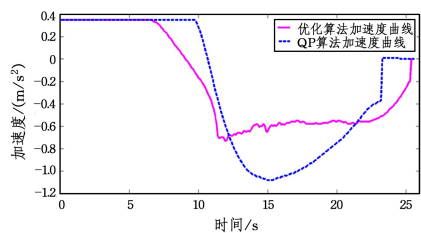


图 13 初速 20.4 km/h 的加速度变化曲线

Fig. 13 Acceleration change curve of initial speed 20.4 km/h

图 11 中,基于 QP 算法时,在 0 到 5.9 s 智能车匀速行驶;在 5.9 s 到 18.1 s 智能车减速行驶,平均减速度约为 1.1 m/s²,最大减速度为 1.18 m/s²;在 18.1 s 时智能车到达

终点并停车;在 18.1 s 到 22.7 s 智能车保持停止状态。基于本文算法时,在 0 到 0.9 s 加速度由 0.4 m/s² 降低至 0,智能车变加速行驶;在 0.9 s 到 22.7 s 智能车减速行驶,平均减速度约为 0.6 m/s²,最大减速度为 1.02 m/s²;在 22.7 s 时智能车到达终点并停车。

图 12 中,基于 QP 算法时,在 0 到 4.9 s 加速度为 0.35 m/s²,智能车匀加速行驶;在 4.9 s 到 7.0 s 加速度由 0.4 m/s² 降低至 0,智能车变加速行驶;在 7.0 s 到 19.1 s 智能车减速行驶,平均减速度约为 1.1 m/s²,最大减速度为 1.26 m/s²;在 19.1 s 时智能车到达终点并停车;在 19.1 s 到 23.4 s 智能车保持停止状态。基于本文算法时,在 0 到 1.9 s 加速度为 0.35 m/s²,智能车匀加速行驶;在 1.9 s 到 4.3 s 加速度由 0.35 m/s² 降低至 0,智能车变加速行驶;在 4.3 s 到 23.4 s 智能车减速行驶,平均减速度约为 0.6 m/s² 左右,最大减速度为 0.93 m/s²;在 23.4 s 时智能车到达终点并停车。

图 13 中,基于 QP 算法时,在 0 到 9.7 s 加速度为 0.35 m/s²,智能车匀加速行驶;在 9.7 s 到 10.6 s 加速度由 0.35 m/s² 降低至 0,智能车变加速行驶;在 10.6 s 到 24.6 s 智能车减速行驶,平均减速度约为 1 m/s² 左右,最大减速度为 1.08 m/s²;在 24.6 s 时智能车到达终点并停车;在 24.6 s 到 27.4 s 智能车保持停止状态。基于本文算法时,在 0 到 6.7 s 加速度为 0.35 m/s²,智能车匀加速行驶;在 6.7 s 到 9.1 s 加速度由 0.35 m/s² 降低至 0,智能车变加速行驶;在 9.1 s 到 25.6 s 智能车减速行驶,期平均减速度约为 0.6 m/s²,最大减速度为 0.73 m/s²;在 25.6 s 时智能车到达终点并停车。

综上所述,本文提出的基于梯形速度规划的算法能够有效改进 QP 算法停车过程中减速较晚的问题,使减速过程更加平稳,提高了乘坐的舒适性。

结束语 本文针对 QP 算法应用于智能车速度规划时,停车过程存在减速较晚导致减速距离短、减速度大而影响乘坐舒适性的问题,提出了基于梯形规划曲线的速度规划算法。该算法首先建立了速度规划的 QP 模型并利用 qpOASES 库求解速度曲线,满足了大部分场景下的速度规划需求;然后针对停车过程减速较晚的问题,分析了不同初速度下梯形规划曲线的停车过程,并将求解的速度作为 QP 算法的非线性约束来实例化 QP 模型并求解;最后进行了仿真实验和实车实验,对比分析了不同初速度下 QP 算法和本文算法的实验数据。

仿真实验中,车辆分别以 39.8 km/h, 31.5 km/h, 20.6 km/h 的初速度经过停车决策点后进入停车过程,QP 算法和本文算法的规划结果表明:本文算法能够明显将减速开始时间提前,初步表明本文算法具有明显的优化效果。实车实验时,设置的环境条件与仿真实验相同,实际分别以 39.5 km/h, 31.1 km/h, 20.4 km/h 的初速度进入停车过程,根据停车过程中底层执行的加速度曲线进行实验分析,结果表明本文算法能够让智能车提前减速,并降低了平均减速度和最大减速度,使智能车停车更平稳。综上,本文算法能够有效改进 QP 算法存在的减速较晚的不足,提高了智能车停车过程中的舒适性。

本文尚未对紧急刹车情况下的停车过程速度规划进行研究,这将是下一步研究的内容。

参考文献

- [1] DAVID J G, CHARLES B N, MAZEN F. A hierarchical approach for primitive-based motion planning and control of autonomous vehicles [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2014, 62(2): 214-228.
- [2] INGRID J, JIN J C, MA X L, et al. Look-ahead speed planning for heavy-duty vehicle platoons using traffic information [J]. *Transportation Research Procedia*, 2017, 22(3): 561-569.
- [3] JORGE V, VICENTE M, JOSHUE P, et al. Path and speed planning for an automated public transport vehicle [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, 60(2): 252-265.
- [4] JIANG Y, GONG J W, XIONG G M, et al. Research on Differential Constraints-based Planning Algorithm for Autonomous-driving Vehicles [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(12): 2012-2020. (in Chinese)
姜岩, 龚建伟, 熊光明, 等. 基于运动微分约束的无人车辆纵横协同规划算法的研究 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(12): 2012-2020.
- [5] REZA T, NICHOLAS M, STEPHEN B, et al. A simple effective heuristic for embedded mixed-integer quadratic programming [J/OL]. *International Journal of Control*, [2017-4-24][2019-3-10]. <http://dx.doi.org/10.1080/00207179.2017.1316016>.
- [6] ZHAO M, LI S Y. Nonlinear model predictive control optimization algorithm based on the trust-region quadratic programming [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(6): 634-640. (in Chinese)
赵敏, 李少远. 基于信赖域二次规划的非线性模型预测控制优化方法 [J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(6): 634-640.
- [7] BRAND M, SHILPIEKANDULA V, YAO C, et al. A parallel quadratic programming algorithm for model predictive control [C]//18th World Congress of the International Federation of Automatic Control. Milano: IEEE Press, 2011: 1031-1039.
- [8] ZENG X R, WANG J M. Globally energy-optimal speed planning for road vehicles on a given route [J]. *Transportation Research Part C*, 2018, 93(8): 148-160.
- [9] STEFAN F. Campbell Steering Control of an Autonomous Ground Vehicle with Application to the Data Urban Challenge [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [10] LIU R, KOCH A, ZELL A. Path following with passive UHF RFID received signal strength in unknown environments [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Washington D. C.: IEEE Press, 2013: 2250-2255.
- [11] JIANG Y, ZHAO X J, GONG J W, et al. System Design of Self-driving in Simplified Urban Environments [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(20): 103-112. (in Chinese)
姜岩, 赵熙俊, 龚建伟, 等. 简单城市环境下地面无人驾驶系统的设计研究 [J]. *机械工程学报*, 2012, 48(20): 103-112.
- [12] PIAZZI A, BIANCO C G L, BERTOZZI M, et al. Quintic G2-splines for the iterative steering of vision-based autonomous vehicles [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2002, 3(1): 27-36.
- [13] XIAO Y L. Development of Speed Advisory for Commercial Vehicles Based on Environmental Conditions [C]//15th ITS World Congress. New York: IEEE Press, 2008: 50-51.
- [14] ZHAO S E, QU X, ZHANG J L. Prediction of Safe Vehicle Speed on Curved Roads Based on Driver-Vehicle-Road Collaboration [J]. *Automotive Engineering*, 2015, 37(10): 1208-1220. (in Chinese)
赵树恩, 曲贤, 张金龙. 基于人车路协同的车辆弯道安全车速预测 [J]. *汽车工程*, 2015, 37(10): 1208-1220.
- [15] HANS J F, CHRISTIAN K, ANDREAS P, et al. qpOASES: a parametric active-set algorithm for quadratic programming [J/OL]. *Mathematical Programming Computation*, [2014-4-30][2019-3-15]. <http://dx.doi.org/10.1007/s12532-014-0071-1>.
- [16] ZHU Y, CHEN H, MU H H. A novel approach of tuning trapezoidal velocity profile for energy saving in servomotor [C]//2015 34th Chinese Control Conference (CCC). Hangzhou: IEEE Press, 2015: 4412-4417.
- [17] XIA T. The Research of Velocity Planning And Path Tracking control Method For Intelligent Vehicle [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017. (in Chinese)
夏天. 智能车速度规划及路径跟踪控制方法研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2017.