

智能车速度规划算法综述

陶 溢¹, 朱 祺¹, 李永乐²

¹中国人民解放军 63963 部队, 北京, 中国, 100072

²陆军军事交通学院军事交通运输研究所, 天津, 中国, 300161

Email: passionggg@163.com

摘 要: 针对智能车的速度规划问题, 首先阐述了速度规划的含义及其与智能车运动规划各模块的相互联系, 分析了速度规划对于整个自动驾驶系统安全性和舒适性的重要影响。然后, 基于期望加减速度生成速度曲线的方法的含义, 就该方法在处理动静态障碍、增加横向动力学约束、能量节约及算法的适应性等方面的相关研究和存在问题进行了分析。其次, 将非结构道路环境和结构化环境中的已知条件转换为时空域的约束条件, 基于优化方法生成速度曲线的基本方法, 根据安全性和舒适性两个重要指标, 采用 DP (动态规划) 和 QP (二次规划) 方法对速度规划问题进行求解。最后, 分析了两种方法各自的优缺点, 为将来智能车速度规划的进一步研究提出了展望。

关键词: 智能车; 速度规划算法; 期望加减速度; 优化

1 前言

通常, 智能车相关研究主要围绕“我在哪”、“要去哪”、“怎么去”三个基本问题展开, 智能车软件系统可划分为包括定位、感知、决策规划和控制四大模块^[1]。其中决策规划模块根据宏观路径抉择驾驶动作, 继而综合车辆位置及状态、环境信息生成一条包含位姿、速度、时间的可执行轨迹^[2]。

智能车规划算法主要包含直接构造法与路径-速度分解法^[4]。基于直接构造法, 文献^[5]提出基于 5 次多项式构造的轨迹, 适用于各种道路环境。但直接构造法缺乏对动态障碍运动趋势的预测, 可能会导致不必要的“猛加猛减”情况。基于路径-速度分解法, 文献^[6]提出的梯形速度规划算法动态障碍有较好的避让效果。文献^[7]提出了基于车辆换道轨迹道路曲率信息的经济车速的优化方法, 在安全行驶的基础上提升了燃油经济性。目前而言, 路径-速度分解法存在适用于特定场景的不足。

2 智能车速度规划的重要意义

决策规划模块包括宏观路径规划和运动规划。宏观规划即宏观路径选择, 相当于驾驶员利用普通电子导航地图进行导航, 不同之处在于宏观路径规划的基本单元为车道, 而普通电子地图的基本单元为道路。运动规划 (图 1.1) 包括局部路径规划和速度规划, 局部路径规划根据环境感知、定位、宏观路径、高精度地图和车辆底层等信息决策行为 (如超车、换道), 根据决策结果搜索一条包含多个位姿序列的无碰撞路径, 规划结果用于车辆横向控制; 速度规划综合无碰撞路径和动态障碍物运动轨迹预测结果计算可执行路径上的速度分布, 给位姿点赋予时间、速度等属性^[4], 将可执行路径转换为可行驶轨迹, 规划结果用于车辆纵向控制。



Figure 1. Smart car motion planning diagram

图 1. 智能车运动规划示意图

项目资助信息: 国家重点研发计划项目-智能电动汽车路径规划及自主决策方法 (2016YFB0100903) 资助

速度规划作为智能车运动规划的重要组成部分,是实现合理纵向控制的前提,是自动驾驶的核心技术之一。智能车具备良好的速度规划功能能为下一步自动控制奠定良好基础,对提升整车安全性、舒适性具有重要意义。此外,还能减少燃油消耗和行驶时间,提升使用经济性和时效性。

综上,智能车作为智能交通系统的关键组成部分,相关研究是解决目前面临交通问题的重要方案之一,展开智能车速度规划研究对于促进智能车落地实用、加快智能交通系统的建设具有积极推动作用。

目前,文献中对速度规划的相关研究主要分为基于期望加减速速度生成速度曲线的方法和基于优化方法生成速度曲线的方法。

3 基于期望加减速速度生成速度曲线

基于期望加减速度的方法假设智能车尽量以期望速度行驶并且加减速过程中均为匀变速运动(非紧急情况下),规划过程中根据当前车速和剩余路径长度确定加速、匀速和减速过程的分界点并求解出未来一段时间内的速度曲线,完成速度规划。Liu 等^[8]基于车辆当前位置的纵向速度规划,无障碍时以环境允许的最大行驶速度作为期望速度;有障碍影响本车时根据与障碍物的相对距离和期望减速度规划减速过程,在障碍后方安全距离内停车,该方法已成功应用于 DARPA 挑战赛。姜岩和 LUCA 等^{[2][3]}在文献[10]的基础上增加了横向动力学对期望速度约束,利用宏观路径规划结果的最大曲率变化选择最高行驶速度,行驶过程中根据预瞄曲率调整行驶速度在保证横向安全性的基础上^[11],实现快速行驶。具体规划过程中,根据本车当前速度、终点速度、参数(包括最大加减速速度、期望行驶速度及运动学约束等)和环境中的障碍信息求得路径上各点的速度分布。提出的方法能够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,该方法在无障碍时以最高速度行驶,有障碍时根据相对位置紧急减速,提高车辆的纵向安全性和舒适性,但该方法只能适用于简单城市环境并且时速需要限制在 40km/h 以内。夏天^[7]分析了梯形速度规划的基本原理,根据当前车速和规划距离的确定了 6 种规划情形,并分析了每种情形的规划结果和车速变化情况。然后,针对传统的梯形规划算法对于静态障碍物具有良好的规划效果,对动态障碍物的跟踪效果不理想,而城市结构化道路环境中障碍物多为同车道行驶的动态车辆这一问题,提出了在保持安全车距的前提下尽量缩短两车车距,保持与前车车速一致的规划原则,大大改善了针对动态障碍物的规划效果,增加了算法的通用性。段建明等^[10]针对文献[12][13]存在的车速变化会影响车辆对目标速度的跟踪以及环境中存在动态障碍物时规划效果较差,甚至导致碰撞的问题,提出了基于中间速度的梯形速度规划方法,将动态障碍物作为规划结果的影响因素,避免生成的速度曲线的波动,提升算法对不同环境的适应性,根据人体对改进前后加速度变化的感受表明改进算法能够有效提高乘坐舒适度。

4 基于优化方法生成速度曲线

基于优化方法的速度曲线生成方法是根据最高行驶速度、加速度等约束条件和安全性、舒适性等评价指标确定速度曲线。Jorge V 等^[14]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。为满足公交车效率性和舒适性两个关键指标,根据规划出曲率有界并连续的平滑路径,在此基础上同时考虑横向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。该方法求解结果具有良好的鲁棒性,能获得具有较好舒适性的速度和加速度曲线。虽该方法的规划结果与人工驾驶时舒适性一致,但需要进一步考虑时间因素。Zeng 等^[15]针对包含若干停车标志、交通信号灯、弯道以及不同坡度、限速道路环境的速度规划问题,将距离域和其他非标准约束转为时间域的标准约束,采用动态规划^{[16][17]}(DP)的优化方法求解智能车沿给定路线自动驾驶的最优速度规划方案,以 8 公里线路为例的仿真研究表明,与普通速度曲线相比,该规划方法能够节约 19%的能量,但此方法未考虑障碍的影响。Fan 等^[18]将速度规划问题转换为一个基于二次规划(QP)的优化问题,采用 5 次样条曲线^[19]作为规划结果数学表达式,使规划结果的速度、加速度以及加速度导数均连续可导,提高智能车乘坐舒适性。基于安全性和舒适性指标构建目标函数,设计包括平滑性、单调性、防碰性在内的约束条件,确保规划结果的合理性和安全性。最后,借助 qpOASES 函数库^[20]求解最优速度曲线。实车实验表明,该方法能够有效解决大多数场景下的智能车速度规划问题,具有较大的实用性。

5 结 论

目前, 相关研究已能够较好解决智能车在一定场景实现自动驾驶的速度规划问题, 并且能够满足智能车的安全性和稳定性要求, 具有较高的可靠性。将来需要继续展开复杂场景下研究, 进一步提高算法的鲁棒性以适应面千变万化的道路环境, 甚至正确处理交通参与者不遵守交通规则、遭遇极端恶劣天气等极端紧急情况, 促进智能车在更广泛的场景下的实际应用。

参考文献 (References)

- [1] 陶倩文, 胡钊政, 蔡浩等. 车辆感知与定位研究—第 29 届国际智能车大会综述[R]. 江苏常熟: 第 29 届国际智能车大会, 2019.
- [2] 姜岩, 龚建伟, 熊光明等. 基于运动微分约束的无人车辆纵横向协同规划算法的研究[J]. 自动化学报, 2013, 39(12): 2012-2020.
- [3] LUCA C, MARCO L, ANDREA M, et al. An optimal complexity algorithm for minimum-time velocity planning[J]. Systems & Control Letters, 2017, 103(4): 50-57.
- [4] 余卓平, 李奕姗, 熊璐. 无人车运动规划算法综述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(8): 1150-1157.
- [5] Werling M, Ziegler J, Kammel S, et al. Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a frenet frame[C]. Robotics and Automation, 2010 IEEE International Conference, 2010: 987-993.
- [6] 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.
- [7] 金辉, 丁峰. 智能车辆换道行驶的经济车速研究[J]. 汽车工程, 2018, 40(5): 542-553.
- [8] LIU R, KOCH A, ZELL A. Path following with passive UHF RFID received signal strength in unknown environments [C]. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Washington D. C, USA: IEEE Press, 2013: 2250-2255.
- [9] Jorge Villagra, Vicente Milanes, Joshue Perez, et al. Smooth path and speed planning for an automated public transport vehicle[J]. Robotics and Autonomous Systems, 60(2012): 252-265.
- [10] 段建明, 田晓生, 夏天, 花晓峰. 基于中间速度的智能车辆梯形速度规划方法[J]. 计算机工程, 2018, 44(8): 301-307.
- [11] INGRID J, JIN J C, MA X L, et al. ScienceDirect: Transportation Research Procedia[J]. ScienceDirect: Transportation Research Procedia, 2017, 22(4): 561-569.
- [12] Stefan F. Campbell Steering Control of an Autonomous Ground Vehicle with Application to the Data Urban Challenge[D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [13] LIU C L, ZHAN W, MASAYOSHI T. Speed Profile Planning in Dynamic Environments via Temporal Optimization[C]. 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, CA, USA: IEEE Press, 2017: 154-159.
- [14] NI L M, LIU Y, LAU Y C, et al. LANDMARC: indoor location sensing active RFID[J]. Wireless Networks, 2004, 10(6): 701-710.
- [15] Zeng X R, Wang J M. Globally energy-optimal speed planning for road vehicles on a given route[J]. Transportation Research Part C, 93(2018): 148-160.
- [16] INGRID J, JIN J C, MA X L, et al. ScienceDirect: Transportation Research Procedia[J]. ScienceDirect: Transportation Research Procedia, 2017, 22(4): 561-569.
- [17] Fan H Y, Zhu F, Liu C C. Baidu Apollo EM Motion Planner [J/OL]. 2018-7-20.
- [18] DAVID G, VICENTE M, JOSHUE P, et al. Speed Profile Generation based on Quintic Bezier Curves for Enhanced Passenger Comfort[C]. 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems, Rio de Janeiro, Brazil: IEEE Press, 2016: 814-819.
- [19] ZHANG Y, CHEN H, MA XiaoLiang, et al. Toward a More Complete, Flexible, and Safer Speed Planning for Autonomous Driving via Convex Optimization[J]. Sensors, 2018, 18(3): 1-29.
- [20] Hans J F, Christian K, Andreas P, et al. qpOASES: a parametric active-set algorithm for quadratic programming[J]. Mathematical Programming Computation, 2014, 6(4): 327-363.