



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院空天信息创新研究院
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2021
01
VOL.26

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB





第26卷第1期（总第297期）
2021年1月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院
主办单位 中国科学院空天信息创新研究院
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 吴一戎
编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会
通信地址 北京市海淀区北四环西路19号
邮 编 100190
电子信箱 jig@radi.ac.cn
电 话 010-58887035
网 址 www.cjig.cn

广告发布登记号 京朝工商广登字20170218号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)
印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Aerospace Information Research Institute, CAS
China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief Wu Yirong
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics
Address No. 19, North 4th Ring Road West, Haidian District, Beijing, P. R. China
Zip code 100190
E-mail jig@radi.ac.cn
Telephone 010-58887035
Website www.cjig.cn

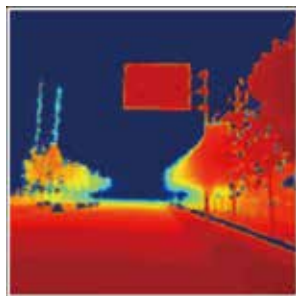
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB
ISSN 1006-8961
CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406
国内邮发代号 82-831
国内定价 60.00元



面向智能驾驶的平行视觉感知：基本概念、框架与应用
(第0067页)



Edge-guided GAN: 边界信息引导的深度图像修复
(第0186页)



利用边缘计算的多车协同激光雷达SLAM(第0218页)

序言	王飞跃, 张云泉 I
编者按	II

综述

面向智能驾驶测试的仿真场景构建技术综述	
任秉韬, 邓伟文, 白雪松, 李江坤, 纵瑞雪, 朱冰, 丁娟	0001
自动驾驶软件测试技术研究综述	
冯洋, 夏志龙, 郭安, 陈振宇	0013
强化学习的自动驾驶控制技术研究进展	
潘峰, 鲍泓	0028
自动驾驶地图的数据标准比较研究	
詹骄, 郭迟, 雷婷婷, 屈宜琪, 吴杭彬, 刘经南	0036
视觉感知的端到端自动驾驶运动规划综述	
刘旖菲, 胡学敏, 陈国文, 刘士豪, 陈龙	0049

平行驾驶

面向智能驾驶的平行视觉感知：基本概念、框架与应用	
李轩, 王飞跃	0067
平行视觉的基本框架与关键算法	
张慧, 李轩, 王飞跃	0082

目标检测与跟踪

自动驾驶场景的尺度感知实时行人检测	
徐歆恺, 马岩, 钱旭, 张龔	0093
实时视觉目标跟踪与视频对象分割多任务框架	
李瀚, 刘坤华, 刘嘉杰, 张晓晔	0101
提升预测框定位稳定性的视频目标检测	
郝腾龙, 李熙莹	0113
道路结构特征下的车道线智能检测	
张翔, 唐小林, 黄岩军	0123
适用全速域大曲率路径的自动驾驶跟踪算法	
张龔, 郑颖, 鲍泓	0135
伪3D卷积神经网络与注意力机制结合的疲劳驾驶检测	
庄员, 戚湧	0143
基于眼部自商图—梯度图共生矩阵的疲劳驾驶检测	
潘剑凯, 柳政卿, 王秋成	0154

自动驾驶场景感知与仿真

结合局部平面参数预测的无监督单目图像深度估计	
周大可, 田径, 杨欣	0165
深度纯追随的拟人化无人驾驶转向控制模型	
单云霄, 黄润辉, 何泽, 龚志豪, 景民, 邹雪松	0176
Edge-guided GAN: 边界信息引导的深度图像修复	
刘坤华, 王雪辉, 谢玉婷, 胡坚耀	0186
引入概率分布的深度神经网络贪婪剪枝	
胡骏, 黄启鹏, 刘嘉昕, 刘威, 袁淮, 赵宏	0198

高精地图构建与SLAM

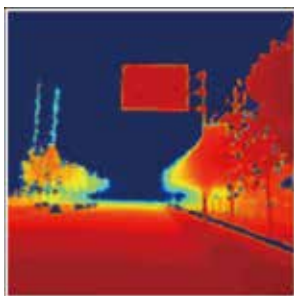
开放道路中匹配高精度地图的在线相机外参标定	
廖文龙, 赵华卿, 严骏驰	0208
利用边缘计算的多车协同激光雷达SLAM	
崔明月, 钟仕鹏, 刘思瑶, 李博洋, 吴成昊, 黄凯	0218

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Parallel visual perception for intelligent driving: basic concept, framework and application (P0067)



Edge-guided GAN: a depth image inpainting approach guided by edge information (P0186)



Cooperative LiDAR SLAM for multi-vehicles based on edge computing (P0218)

Review

- Technologies of virtual scenario construction for intelligent driving testing
Ren Bingtao, Deng Weiwen, Bai Xuesong, Li Jiangkun, Zong Ruixue, Zhu Bing, Ding Juan 0001
- Survey of testing techniques of autonomous driving software
Feng Yang, Xia Zhilong, Guo An, Chen Zhenyu 0013
- Research progress of automatic driving control technology based on reinforcement learning
Pan Feng, Bao Hong 0028
- Comparative study on data standards of autonomous driving map
Zhan Jiao, Guo Chi, Lei Tingting, Qu Yiqi, Wu Hangbin, Liu Jingnan 0036
- Review of end-to-end motion planning for autonomous driving with visual perception
Liu Yifei, Hu Xuemin, Chen Guowen, Liu Shihao, Chen Long 0049

Parallel Driving

- Parallel visual perception for intelligent driving: basic concept, framework and application
Li Xuan, Wang Feiyue 0067
- The basic framework and key algorithms of parallel vision
Zhang Hui, Li Xuan, Wang Feiyue 0082

Object Detection and Tracking

- Scale-aware EfficientDet: real-time pedestrian detection algorithm for automated driving
Xu Xinkai, Ma Yan, Qian Xu, Zhang Yan 0093
- Multitask framework for video object tracking and segmentation combined with multi-scale inter-frame information
Li Han, Liu Kunhua, Liu Jiajie, Zhang Xiaoye 0101
- Video object detection method for improving the stability of bounding box
Hao Tenglong, Li Xiying 0113
- Intelligent detection of lane based on road structure characteristics
Zhang Xiang, Tang Xiaolin, Huang Yanjun 0123
- Autonomous vehicle tracking algorithm for high curvature path in full speed range
Zhang Yan, Zheng Ying, Bao Hong 0135
- Driving fatigue detection based on pseudo 3D convolutional neural network and attention mechanisms
Zhuang Yuan, Qi Yong 0143
- Fatigue driving detection based on ocular self-quotient image and gradient image co-occurrence matrix
Pan Jiankai, Liu Zhengqing, Wang Qiucheng 0154

Scene Perception and Simulation of Autonomous Driving

- Unsupervised monocular image depth estimation based on the prediction of local plane parameters
Zhou Dake, Tian Jing, Yang Xin 0165
- Human-like steering model for autonomous driving based on deep pure pursuit method
Shan Yunxiao, Huang Runhui, He Ze, Gong Zhihao, Jing Min, Zou Xuesong 0176
- Edge-guided GAN: a depth image inpainting approach guided by edge information
Liu Kunhua, Wang Xuehui, Xie Yuting, Hu Jianyao 0186
- Greedy pruning of deep neural networks fused with probability distribution
Hu Jun, Huang Qipeng, Liu Jiaxin, Liu Wei, Yuan Huai, Zhao Hong 0198

High-Definition Map Construction and SLAM

- Online extrinsic camera calibration based on high-definition map matching on public roadway
Liao Wenlong, Zhao Huaqing, Yan Junchi 0208
- Cooperative LiDAR SLAM for multi-vehicles based on edge computing
Cui Mingyue, Zhong Shipeng, Liu Siyao, Li Boyang, Wu Chenghao, Huang Kai 0218

中图法分类号: TP24 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2021)01-0135-08

论文引用格式: Zhang Y, Zheng Y and Bao H. 2021. Autonomous vehicle tracking algorithm for high curvature path in full speed range. Journal of Image and Graphics, 26(01): 0135-0142 (张龔, 郑颖, 鲍泓. 2021. 适用全速域大曲率路径的自动驾驶跟踪算法. 中国图象图形学报, 26(01): 0135-0142) [DOI:10.11834/jig.200435]

适用全速域大曲率路径的自动驾驶跟踪算法

张龔¹, 郑颖¹, 鲍泓^{1,2}

1. 中国矿业大学(北京), 北京 100083; 2. 北京联合大学, 北京 100101

摘要: 目的 路径跟踪是自动驾驶汽车根据感知、决策和规划结果正确沿道路行驶的关键部分。目前路径跟踪算法难以在全速域、复杂路径场景和高自由度动力学模型下取得优异的性能,并且未考虑与纵向控制的耦合特性,限制了控制算法的跟踪性能。针对以上问题,提出了一种基于速度自适应预瞄的无模型转向控制算法。方法 根据车辆与跟踪路径的横向偏差与角度偏差,建立车辆方向盘输出控制量方程,该方法实现了在动力学高度复杂情况和跟踪路径可导情况下的低速稳定跟踪。同时根据车辆纵向速度自适应设置跟踪预瞄距离,并将速度耦合参数加入方程,实现了车辆全速域、全路径的稳定跟踪。结果 本文在 PanoSim 自动驾驶仿真系统和 Simulink 仿真软件进行仿真实验,在高自由度动力学模型下,本文算法实现在超高速(>220 km/h)直线及小曲率跟踪路径中横向偏差变化量 Δd 的模 $|\Delta d| < 0.1$ m、在高速(>150 km/h)大曲率弯道跟踪路径中 $|\Delta d| < 0.3$ m 的性能。结论 本文提出的基于速度自适应预瞄的无模型转向控制算法可以实现全速域、大曲率的路径稳定跟踪。

关键词: 自动驾驶;转向控制;路径跟踪;预瞄;速度耦合;PanoSim

Autonomous vehicle tracking algorithm for high curvature path in full speed range

Zhang Yan¹, Zheng Ying¹, Bao Hong^{1,2}

1. China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Beijing Union University, Beijing 100101, China

Abstract: **Objective** Path tracking is the key part of an automatic driving vehicle running along a road according to the perception system and decision system results. The control module involved in path tracking is the lowest-level software algorithm module of autopilot, which includes two parts: lateral control and longitudinal control. Steering control is mainly responsible for vehicle steering output control, and longitudinal control is mainly responsible for throttle and brake control. The steering control algorithm tracks and controls the path of the two upper frameworks on the basis of perception and decision, and it optimizes the tracking error to ensure the stability and comfort of the self-driving vehicle. Current tracking algorithms mainly include model-free lateral control algorithm and model-based lateral control algorithm. The representative of model free lateral control algorithm is proportion integration differentiation (PID) control. The PID algorithm is difficult to use in controlling automatic driving vehicles without considering the physical characteristics of the vehicle and in high-speed and complex environments. The model-based lateral control algorithm includes the lateral control algorithm based on vehicle kinematics model and the lateral dynamics algorithm based on vehicle dynamic model. The former is represented by the Stanley method based on front-wheel feedback and rear-wheel control based on rear-wheel feedback. The latter is represented by the lateral control algorithm of linear quadratic regulator based on the dynamic model. Algorithms based on the vehi-

收稿日期:2020-07-31;修回日期:2020-10-27;预印本日期:2020-11-03

cle model need to accurately model the kinematic or dynamic characteristics of the vehicle and usually need to simplify the model to predict the state of vehicle tracking deviation by simplifying the modeling of the model. This approach thus achieves accurate control of the vehicle. In addition, these two lateral control algorithms do not consider the coupling characteristics with longitudinal control, which limits the tracking performance of the control algorithm. To address the problems of high-complexity vehicle model and current path tracking algorithm, this paper proposes a model free-steering control algorithm based on speed-adaptive preview. **Method** In the face of highly complex or unknown dynamic performance of the vehicle dynamics model, accurately calculating the state equation of vehicle path tracking deviation through dynamic characteristics is impossible. However, due to the complex dynamic characteristics, the control quantity obtained through kinematic characteristics will cause many errors, especially in the case of high-speed driving, large curvature, and nondifferentiable path. The cumulative error of these two methods may lead to a self-driving car going out of control. Therefore, the model-free control method can achieve stable and accurate path tracking performance in the full speed range under complex dynamic conditions. Considering the stable tracking in scenes with non-conductance and large curvature, this paper uses the speed-adaptive preview method to enhance the stability of autopilot under complex road conditions. According to the intelligent driving vehicle model studied in this paper, the control input includes the lateral distance difference between the vehicle and the tracking path, the angle between the vehicle and the tracking path, and the coupling parameters of the longitudinal speed of the vehicle. The output of the control algorithm includes the steering wheel angle, the throttle opening, and the brake master cylinder pressure. The former mainly controls the direction of the vehicle, while the latter controls the forward speed. In this paper, the output control equation of vehicle steering control is established first according to the deviation distance and angle between the vehicle and the tracking path. This method realizes stable tracking at low speed under the condition of highly complex dynamics and differentiable tracking path. At the same time, the tracking preview distance is set adaptively according to the vehicle longitudinal speed, and the speed coupling parameters are added to the equation to realize the stable tracking of the vehicle in the full speed range and all types of paths. **Result** To verify the proposed path tracking algorithm based on speed-adaptive preview, we participated in the 2020 China Intelligent Vehicle Championship and World Intelligent Driving Challenge online simulation competitions. In this experiment and competition, PanoSim automatic driving simulation system and Simulink simulation software are used for the simulation experiment. The test road is a 10 km test freeway provided by Panosim, and it includes five sections with large curvature and five sections with small curvature. In this paper, we select a typical section of the small curvature section and large curvature section to test the algorithm. Under the dynamic model with a high-degree-of-freedom dynamic model, the proposed algorithm can achieve the performance of lateral deviation $|\Delta d| < 0.1$ m on the ultra-high speed (> 220 km/h) straight-line, and small-curvature tracking path, and $|\Delta d| < 0.3$ m on the high-speed (> 150 km/h) high-curvature curve tracking path. **Conclusion** In this paper, the path tracking algorithm based on speed preview is proposed, and the model free lateral control algorithm is studied to realize the control coverage from a simple to a complex vehicle model; the optimization of vehicle lateral control by a speed coupler is studied to realize the full speed range control coverage of the vehicle; and the controller based on speed-adaptive preview is studied to realize the transition from the differentiable path to the nondifferentiable path. To some extent, the problem of control hysteresis and overshoot is solved.

Key words: automatic driving; steering control; path tracking; preview; velocity coupling; PanoSim

0 引言

自动驾驶汽车由3大技术框架组成:感知模块、决策模块和控制模块。控制模块是自动驾驶汽车最底层的软件算法模块,包括横向控制和纵向控制两部分。横向控制主要负责车辆方向盘输出的控制,纵向控制主要负责油门和刹车的控制。横向控制算

法根据感知和决策两个上层框架规划输出的路径进行跟踪控制,并优化跟踪误差,保证自动驾驶汽车行驶的稳定性和舒适性(Li和Wang,2007)。目前的跟踪算法主要包括无模型的横向控制算法和基于模型的横向控制算法。无模型的横向控制算法的代表有比例积分微分(proportion integration differentiation, PID)控制,使用PID算法控制自动驾驶车辆(Marino等,2011)不考虑车辆的物理特性,在面对

高速、复杂的环境时则难以适用(陈慧岩等,2017),基于前馈—反馈控制的自动转向系统,可实现车辆极限工况下的自动驾驶(赵熙俊和陈慧岩,2011),Kayacan等人(2016)提出了一种基于轨迹跟踪误差的鲁棒控制方法,使控制算法在直线和曲线中保持较小的误差要求,基于鲁棒 H_∞ 反馈控制器的路径跟踪算法考虑了轮胎偏侧刚度和外界干扰的不确定性,提高了控制算法的鲁棒性(Hu等,2015)。基于模型的横向控制算法,包括基于车辆运动学模型的横向控制算法和基于车辆动力学模型的横向控制算法,前者的代表有基于前轮反馈控制(front wheel feedback)的Stanley方法(Thrun等,2006)和基于后轮反馈控制(rear wheel feedback)的控制算法(Paden等,2016),后者的代表有基于动力学模型的线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)的横向控制算法(Hu等,2016)。基于车辆模型的算法均需对车辆的运动学特性或动力学特性进行准确的建模,通常需要对模型进行简化,从而通过简化模型的建模来预测车辆跟踪偏差的状态,进而做到对车辆的准确控制。基于车辆模型的方法在面对复杂的车辆模型时难以做到准确建模,导致其期望的输出值本身便存在偏差,在速度域跨越较大时难以实现精确控制的覆盖,并且复杂的算法带来了大量参数调节的工作,效率较低。

1 智能驾驶汽车模型

目前大量路径跟踪算法是基于2自由度(田磊,2015)或3自由度动力学(Segel,1956)模型进行研究,但其无法实现高仿真模型或现实车辆的高速稳定控制(Tagne等,2016)。现实中的车辆模型是极复杂的,通过简化的运动学模型和动力学模型建模难以预测车辆的运动轨迹(Kong等,2015)。车辆依靠轮胎与地面相互作用产生各种运动,因此轮胎对于车辆动力学的控制非常重要(李彬,2010)。本文使用的PanoSim智能汽车仿真软件(王姗姗,2015)提供了复杂车辆模型,其高仿真动力学模型囊括了复杂空气动力学模型、复杂悬架动力学模型(Li等,2017)、复杂轮胎动力学模型(de Wit等,1995)、复杂车身动力学模型和发动机动力总成模型等,并且支持环境因素(道路、天气和交通参与物等)对车辆动力学性能的影响。综合形成了超高自

由度的复杂车辆模型。PanoSim提供的复杂车辆模型输入接口及其输入值范围如表1所示。

表1 PanoSim复杂车辆模型输入量
Table 1 Input of PanoSim complex vehicle model

名称	描述	范围	单位
油门	驾驶员输出车的车辆节气门开度	[0,1]	-
刹车	驾驶员输出的制动主缸压力	[0,5 500 000]	Pa
方向盘输入	驾驶员输出的方向盘转角	[-10,10]	rad

注:“-”指无单位,油门输入范围中,0指不踩油门,1指油门全踩。

表1中,油门输入值越大则汽车输出的加速度越大,刹车输入值越大汽车的制动力越大,方向盘输入对应的前轮转向角为 $-36.6851^\circ \sim 36.9943^\circ$ 。

2 基于速度预瞄的路径跟踪算法

在面对高度复杂或动力学性能未知的车辆动力学模型时,通过动力学特性精确计算得出车辆路径跟踪偏差状态方程是难以实现的,而由于其复杂的动力学特性,通过运动学特性得出车辆的控制量同样会造成大量误差,尤其在高速行驶及大曲率、路径不可导的情况下,这两种方法的累计误差可能导致自动驾驶汽车失控。所以,基于无模型的控制方法反而在复杂的动力学条件下,全速域工况中能达到稳定、精确的路径跟踪性能。考虑到在不可导路径以及大曲率等场景的稳定跟踪,基于视觉预瞄特性的智能车道路预测方法(Guan等,2017)是一种可行的方案,本文使用了基于速度自适应的预瞄方法来增强自动驾驶汽车在复杂路况下行驶的稳定性的。

针对本文研究的智能驾驶汽车模型,控制输入包括车辆与跟踪路径的横向偏差、与跟踪路径的夹角和车辆的纵向速度耦合参数,控制算法的输出量包括汽车方向盘转角、节气门开度和制动主缸压力,前者主要控制车辆前进的方向,后者控制前进的速度。智能驾驶汽车与跟踪路径的偏差关系如图1所示。

图1中 XOY 为地面坐标系, $X_vO_vY_v$ 为车辆坐标系,车辆坐标系的横轴为车辆前轴, AB 为一段可导跟踪路径,横向偏差 d 为前轴中心指向跟踪路径的向量,其指向的点为跟踪点, v 为车辆的纵向速度,

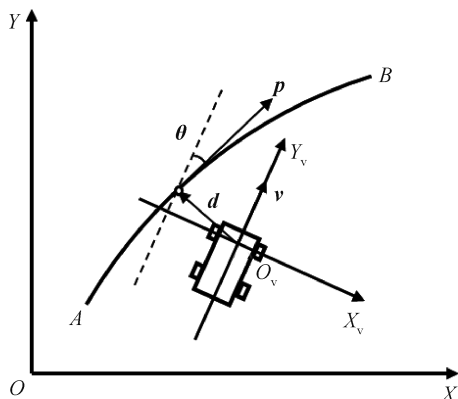


图1 跟踪路径偏差示意图

Fig. 1 Tracking path deviation diagram

p 为跟踪点与 v 同向的切向量, 角度偏差 θ 为 v 与 p 的夹角。

本文提出的基于速度预瞄的路径跟踪算法, 可以通过无模型的横向控制器实现实时可导路径的稳定跟踪, 可在存在大偏差的情况下使车辆轨迹快速收敛至跟踪路径, 为提高车辆在全速域跟踪和收敛的稳定性, 设计了速度耦合器将方向盘转角控制在许可的论域范围内, 以避免轮胎打滑而失效, 使车辆转向更稳定、合理。在应对不可导路径时, 本文设计了速度自适应的预瞄控制器, 自动调整跟踪轨迹保证车辆稳定运行, 并可一定程度解决超调问题。本文算法控制框如图2所示。

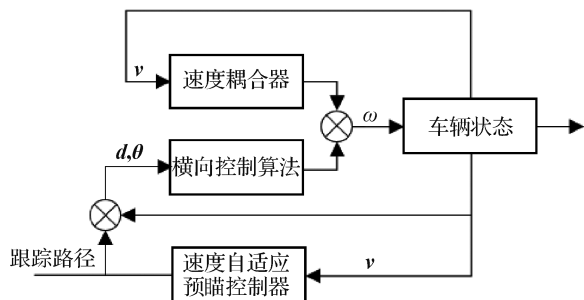


图2 基于速度预瞄的路径跟踪控制框图

Fig. 2 Path tracking control block diagram

2.1 无模型的横向控制器

无模型的横向控制方法将车辆与实时跟踪路径的偏差作为输入量, 这种方法回避了对车辆运动学和动力学的精确建模, 只考虑车辆与跟踪路径的实时偏差, 不考虑车辆预测轨迹与路径的关系。复杂车辆模型的控制具有高度非线性、滞后性等特点, 要实现无模型的横向控制器适配大速域、多路况的稳定控制效果, 关键在于对控制器参数的整定与动态

调整。本文提出的无模型横向控制器, 在某一时刻对方向盘转角 ω 的控制函数为

$$\omega(d, \theta) = k_1 f_d(d) + k_2 f_\theta(\theta) \quad (1)$$

式中, k_1 为距离偏差的增益, k_2 为角度偏差的增益, f_d 为横向偏差的激活函数, f_θ 为角度偏差的激活函数。

为了进一步讨论 k_1 和 k_2 两个增益参数的整定, 本文将路径跟踪的过程分为两个过程和一个状态: 逼近过程、收敛过程、平衡态。在逼近过程中, 车辆与跟踪路径存在一定大小的横向偏差 d , 此时车辆朝跟踪路径方向转向以靠近路径, 同时, 逼近过程会造成角度偏差 θ 的累积, 形成对方向盘转角的减益。在收敛过程中, 方向盘朝跟踪路径的反方向转动, 以缩小累计的角度偏差 θ , 并进一步缩小距离偏差 d 。平衡态指车辆在朝跟踪路径靠近时, 方向盘由朝路径同向转动, 转变为朝路径反向转动时的过程, 方向盘转角输入量为零的时刻即为平衡点, 平衡态是 k_1 和 k_2 两个增益参数互相制约的结果, 车辆朝路径靠近的合适的平衡态分布在一个连续的区间, 平衡点应在区间之内。若平衡点向逼近过程偏移, 跟踪过程则逼近不足收敛过度, 过早进入收敛状态会导致车辆在过远的距离缓慢靠近, 使得靠近跟踪路径的速度大幅下降; 若平衡点向收敛过程偏移, 跟踪过程则逼近过度而收敛不足, 这时跟踪过程会出现“画龙”的现象(即车辆从跟踪路径一侧逼近时穿越到了跟踪路径的另一侧, 再从另一侧逼近, 行驶轨迹似一条盘旋的龙), 影响车辆的控制稳定性, 大大增加在高速行驶时的失控风险。

根据平衡点处的平衡横向偏差 d_b 和平衡角度偏差 θ_b , 可以解得关于 k_1 和 k_2 的表达式

$$k_1 f_d(d_b) + k_2 f_\theta(\theta_b) = 0 \quad (2)$$

可以通过设定某一初始条件下的期望方向盘转角 ω_e 来获得另一组方程, 初始横向偏差 d_0 , 初始角度偏差 θ_0 , 可以解得关于 k_1 和 k_2 的表达式

$$k_1 f_d(d_0) + k_2 f_\theta(\theta_0) = \omega_e \quad (3)$$

根据式(1)~(3)可以解得

$$\omega(d, \theta) = \frac{-f_\theta(\theta_b)\omega_e f_d(d)}{f_\theta(\theta_0)f_d(d_b) - f_\theta(\theta_b)f_d(d_0)} + \frac{f_\theta(\theta)\omega_e f_d(d_b)}{f_\theta(\theta_0)f_d(d_b) - f_\theta(\theta_b)f_d(d_0)} \quad (4)$$

车辆在跟踪路径的收敛阶段末端时, 由于横向偏差 d 和角度偏差 θ 较小, 会导致末端收敛速度缓

慢;在初始偏差过大的情况下,横向控制器可能输出过大的方向盘转动量而导致失控。本文设置了合适的横向偏差与纵向偏差的激活函数 f_d 和 f_θ 以控制偏差的增益,实现更理想的跟踪效果。激活函数可以选择一般的线性函数或 sigmoid 函数等,本文选择线性函数作为横向偏差与纵向偏差的激活函数。

2.2 速度耦合器

汽车的纵向控制和横向控制是一个强耦合的非线性系统(胡平等,2011),在复杂的底盘动力学模型和非线性轮胎动力学模型下,高速行驶非常容易造成失速打滑,失去对车辆的控制。无模型的横向控制器可以根据下一个时刻与跟踪路径的偏差来适应方向盘转角的变化,但是跟踪过程中的前轮转向可能因高速而打滑,所以加入速度耦合器来使得方向盘转角依据实时速度合理化。加入速度耦合器的方向盘转角控制函数为

$$\omega_e(d, \theta, v) = g(v)\omega(d, \theta) \quad (5)$$

式中, v 为实时速度, g 即速度耦合器函数

$$g(v) = \frac{v_m}{v} \quad (6)$$

式中, v_m 即标定速度,速度大于标定速度则允许的方向盘转角越小,反之则越大。

2.3 速度自适应预瞄控制器

由于车辆控制存在明显的迟滞性,所以在应对高速、大曲率、不可导以及复合情况的复杂路径时,无模型的横向控制方法可能造成转向时机滞后、转向不足和跟踪精度不足等问题,进而造成车辆失控,影响驾驶安全,因此必须引入以预瞄控制为基础的前馈控制量(Peng等,1992)。本文设计了基于速度自适应预瞄控制器,使得控制算法跟踪前方一定距离的路径,提高控制算法在复杂情况下的控制稳定性。速度自适应预瞄控制器原理如图3所示。

F' 为跟踪路径 AB 到 O_v 的最近点, $R(v)$ 为速度自适应预瞄距离函数,以 F' 为圆心, $R(v)$ 为半径做一段圆弧 ρ ,与 AB 在 v 正方向的交点即为预瞄点 F ,再以 F 为跟踪点得到横向偏差 d 和角度偏差 θ 。

在不可导路径中,不使用预瞄将带来明显的控制迟滞,如图4所示。

图4中 ABC 为一段不可导跟踪路径, l 为车辆的跟踪路径。图4(a)中没有使用预瞄,在行驶到 B 点时开始跟踪 BC 路径,由于车辆控制系统的滞后

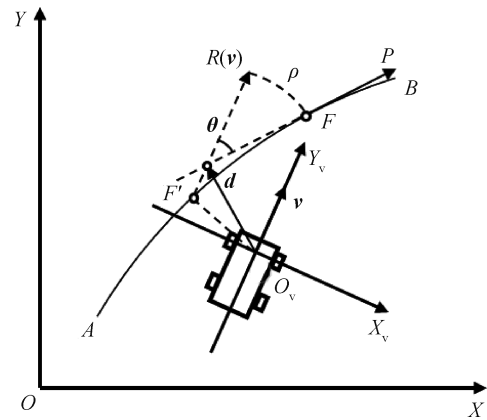


图3 预瞄控制器原理图

Fig. 3 Schematic diagram of preview controller

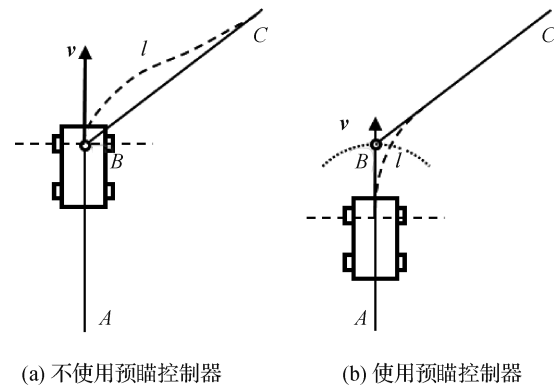


图4 不可导路径的路径跟踪

Fig. 4 Path tracking of non differentiable paths

((a) without preview controller; (b) with preview controller)

性,导致车辆穿越 BC 路段,这在速度较大时会带来严重的性能问题和安全隐患;在图4(b)中,由于使用了预瞄控制器,车辆在行驶到 BC 段之前便开始跟踪该路径,使得车辆保持在靠近的一侧进行跟踪,保证了在不可导路径下的跟踪性能与行车安全。

3 仿真实验和比赛效果

为了验证本文提出的基于速度预瞄的路径跟踪算法的有效性,本文作者参加的“联合彩虹”赛队参加了2020中国智能汽车挑战赛和世界智能汽车挑战赛线上仿真赛,该实验和比赛使用PanoSim自动驾驶仿真系统及SimuLink仿真软件进行仿真实验,实验使用路径为PanoSim中提供的Freeway10KM测试路线,该测试路线包含5个大曲率路段及5个小曲率路段,本文选取比较典型的一段小曲率路段和大曲率路段用做测试,并在全路段测试算法的泛化

性能。测试路线如图 5 所示,图中表明的路段 1 和路段 2 为本文算法所使用的测试路段。

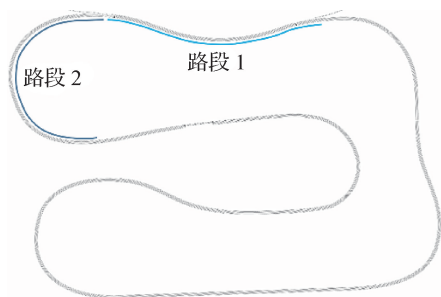


图 5 测试路线图

Fig. 5 Test roadmap

快速跟踪性能指车辆与跟踪路径存在一定距离的情况下,车辆向跟踪路径快速逼近和收敛的性能。本文分别在路段 1 小曲率路径和路段 2 大曲率路径测试车辆的快速靠近跟踪性能。在小曲率跟踪实验中,设置车辆在第 25 s 时由偏置 3.98 m 向小曲率路径靠近跟踪,车辆的纵向速度保持为 100 km/h,小曲率跟踪结果如图 6 所示。

图 6(a)中,平衡点往收敛区间偏移,逼近区间偏大,导致车辆越过跟踪路径,出现了“画龙”现象,并且收敛速度也受到影响,为 4.85 s;图 6(c)中,平衡点往逼近区间偏移,收敛区间偏大,导致车

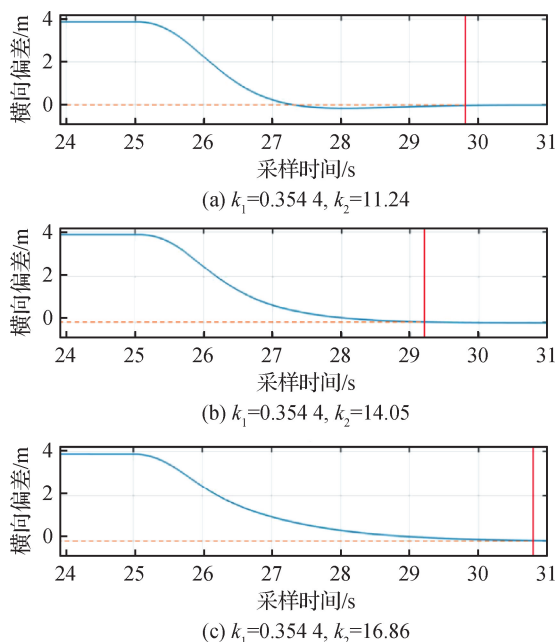


图 6 小曲率路径跟踪结果

Fig. 6 Small curvature path tracking results

((a) $k_1 = 0.3544$, $k_2 = 11.24$; (b) $k_1 = 0.3544$, $k_2 = 14.05$; (c) $k_1 = 0.3544$, $k_2 = 16.86$)

辆长时间处于缓慢的收敛过程,延长了跟踪收敛的时间,为 5.81 s;图 6(b)中,平衡点位置较为合适,收敛过程较为快速、平稳,跟踪收敛的时间为 4.22 s,车辆在稳定跟踪后与跟踪路线的平均横向偏差为 $|\Delta d| = 0.034$ m。

在曲线跟踪实验中,本文在路段 2 大曲率弯道进行测试,初始保持车道为 2 号车道,在第 5 s 时向 3 号车道变道,速度保持 100 km/h 恒定,跟踪路径由 PanoSim 提供的车道线传感器提供,其包含相邻四车道线的可导三次函数的参数。曲线跟踪结果如图 7 所示。

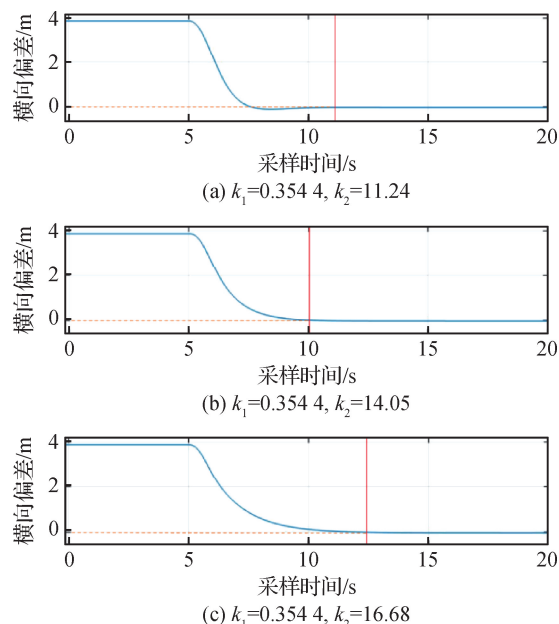


图 7 大曲率可导曲线路径跟踪结果

Fig. 7 Tracking results of large curvature differentiable curve

((a) $k_1 = 0.3544$, $k_2 = 11.24$; (b) $k_1 = 0.3544$, $k_2 = 14.05$; (c) $k_1 = 0.3544$, $k_2 = 16.68$)

图 7 中迅速逼近与收敛的结果与直线跟踪相似,平衡点偏移会带来逼近超调与收敛过慢等现象,在合适的平衡点参数下,跟踪收敛的时间为 5.13 s。在稳定跟踪后与跟踪路线的平均横向偏差变化量的模为 $|\Delta d| = 0.093$ m。

本文算法在 Freeway10KM 测试路线(全测试路线)中实现了沿车道高速行驶的任务,可以实现在小曲率路段极速 260 km/h 的跟踪,并且横向偏差 d 的模 $|d|$ 控制在 0.15 m 之内,在大曲率路段中实现最低 140 km/h,最高 185 km/h 的通过速度,并保持 $|d|$ 在 0.3 m 之内,本算法完成 Freeway10KM 测试

路线用时 226 s, 平均时速 159.26 km/h, 并在行驶过程中未出现失控、碾压车道线等行为。

4 结 论

本文提出的使用全速域大曲率路径的自动驾驶跟踪算法, 实现了以下优化或改进:

1) 研究了无模型的横向控制算法, 实现了从简单到复杂车辆模型的控制覆盖;

2) 研究了速度耦合器对车辆横向控制的优化, 实现了车辆的全速域控制覆盖;

3) 研究了基于速度自适应预瞄的控制器, 实现了从可导路径到不可导路径的覆盖, 一定程度解决了控制迟滞与超调的问题。

相较于目前的路径跟踪算法, 本文算法更易于调参, 并且能适应高复杂度车辆模型的应用场景。

由于本文算法在一次路径跟踪循环中使用定参数算法进行控制, 其无法适应更为现实的情况, 即如在轮胎磨损等机械变化造成的动力学模型发生变化的情况下, 算法的性能可能较期望出现差异。另外由于时间与精力有限, 本文未对输入量激活函数、控制参数最优化做深入研究。未来还可对参数自整定和一些极限状况下(如紧急避让等)的车辆控制做进一步研究。

参考文献(References)

- Chen H Y, Chen S P and Gong J W. 2017. A review on the research of lateral control for intelligent vehicles. *Acta Armamentarii*, 38(6): 1203-1214 (陈慧岩, 陈舒平, 龚建伟. 2017. 智能汽车横向控制方法研究综述. *兵工学报*, 38(6): 1203-1214) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.06.021]
- de Wit C C, Olsson H, Astrom K J and Lischinsky P. 1995. A new model for control of systems with friction. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(3): 419-425 [DOI: 10.1109/9.376053]
- Guan Q Z, Bao H and Xuan Z X. 2017. The research of prediction model on intelligent vehicle based on driver's perception. *Cluster Computing*, 20(4): 2967-2979 [DOI: 10.1007/s10586-017-0946-9]
- Hu C, Jing H, Wang R R, Yan F J and Chadli M. 2015. Robust H_{∞} output-feedback control for path following of autonomous ground vehicles. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 70-71: 414-427 [DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.09.017]
- Hu C, Wang R R, Yan F J and Chen N. 2016. Output constraint control on path following of four-wheel independently actuated autonomous

- ground vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(6): 4033-4043 [DOI: 10.1109/TVT.2015.2472975]
- Hu P, Guo J H, Li L H and Wang R B. 2011. Study on coordinated longitudinal and lateral control of intelligent vehicles using backstepping variable control. *Electric Machines and Control*, 15(10): 88-94 (胡平, 郭景华, 李琳辉, 王荣本. 2011. 智能车辆纵向向反演变结构协调控制. *电机与控制学报*, 15(10): 88-94) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-449X.2011.10.014]
- Kayacan E, Ramon H and Saeyns W. 2016. Robust trajectory tracking error model-based predictive control for unmanned ground vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21(2): 806-814 [DOI: 10.1109/TMECH.2015.2492984]
- Kong J, Pfeiffer M, Schildbach G and Borrelli F. 2015. Kinematic and dynamic vehicle models for autonomous driving control design//2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Seoul, South Korea: IEEE: 1094-1099 [DOI: 10.1109/IVS.2015.7225830]
- Li B. 2010. Study on Lateral Dynamics Control of Four Wheels Active Steering Vehicle. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University (李彬. 2010. 四轮主动转向车辆的侧向动力学控制研究. 上海: 上海交通大学)
- Li L and Wang F Y. 2007. Advanced Motion Control and Sensing for Intelligent Vehicles. New York: Springer [DOI: 10.1007/978-0-387-44409-3]
- Li L, Lu Y S, Wang R R and Chen J. 2017. A three-dimensional dynamics control framework of vehicle lateral stability and rollover prevention via active braking with MPC. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(6): 3389-3401 [DOI: 10.1109/TIE.2016.2583400]
- Marino R, Scalzi S and Netto M. 2011. Nested PID steering control for lane keeping in autonomous vehicles. *Control Engineering Practice*, 19(12): 1459-1467 [DOI: 10.1016/j.conengprac.2011.08.005]
- Paden B, Čáp M, Yong S Z, Yershov D and Frazzoli E. 2016. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 1(1): 33-55 [DOI: 10.1109/TIV.2016.2578706]
- Peng H, Hessburg T, Tomizuka M, Zhang W B, Lin Y, Devlin P, Shladover S E and Arai A. 1992. A theoretical and experimental study on vehicle lateral control//Proceedings of 1992 American Control Conference. Chicago, USA: IEEE: #4792408 [DOI: 10.23919/ACC.1992.4792408]
- Segel L. 1956. Theoretical prediction and experimental substantiation of the response of the automobile to steering control. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Automobile Division*, 10(1): 310-330 [DOI: 10.1243/pime_auto_1956_000_032_02]
- Tagne G, Talj R and Charara A. 2016. Design and comparison of robust nonlinear controllers for the lateral dynamics of intelligent vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(3): 796-809 [DOI: 10.1109/ITITS.2015.2486815]

- Thrun S, Montemerlo M, Dahlkamp H, Stavens D, Aron A, Diebel J, Fong P, Gale J, Halpenny M, Hoffmann G, Lau K, Oakley C, Palatucci M, Pratt V, Stang P, Strohband S, Dupont C, Jendrossek L E, Koelen C, Markey C, Rummel C, Van Niekerk J, Jensen E, Alessandrini P, Bradski G, Davies B, Ettinger S, Kaehler A, Nefian A and Mahoney P. 2006. Stanley: the robot that won the DARPA grand challenge. *Journal of Field Robotics*, 23(9): 661-692 [DOI: 10.1002/rob.20147]
- Tian L. 2015. Research on Virtual Subjective Evaluation of Vehicle Steering Characters. Changchun: Jilin University (田磊. 2015. 汽车转向性能虚拟主观评价方法研究. 长春: 吉林大学)
- Wang S S. 2015. PanoSim: a new generation of advanced automobile intelligent driving simulation system. *IEEE Spectrum*, (10): 68-71 (王姗姗. 2015. PanoSim: 新一代先进汽车智能驾驶模拟仿真系统. 科技纵览, (10): 68-71)
- Zhao X J and Chen H Y. 2011. A study on lateral control method for the path tracking of intelligent vehicles. *Automotive Engineering*, 2011(5):18-23(赵熙俊, 陈慧岩. 2011. 智能车辆路径跟踪横向控制方法的研究. 汽车工程, 2011(5):18-23) [DOI: CNKI:SUN:QCGC.0.2011-05-005]

作者简介



张龔, 1994 年生, 男, 博士研究生, 主要研究方向为图像处理、自动驾驶技术、数据融合。
E-mail: iv_allen@163.com



鲍泓, 通信作者, 男, 教授, 主要研究方向为智能驾驶、视觉计算和分布式网络。
E-mail: baohong@buu.edu.cn

郑颖, 女, 博士研究生, 主要研究方向为图像处理、智能交互、深度学习技术。E-mail: buu_zhengying@sina.com