



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



# 中国图象图形学报

刊名题字：宋健 月刊（1996年创刊）



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

**Supervised 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 4<sup>th</sup> 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.

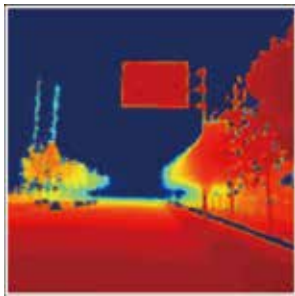
CN 11-3758/TB  
ISSN 1006-8961  
CODEN ZTTXFZ

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
基于眼部自商图一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, 袁准, 赵宏 .....	0198

### 高精地图构建与SLAM

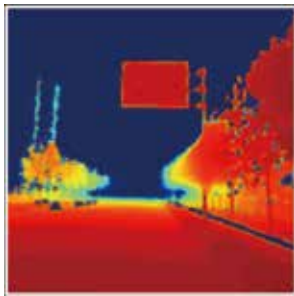
开放道路中匹配高精度地图的在线相机外参标定 廖文龙, 赵华卿, 严骏驰 .....	0208
利用边缘计算的多车协同激光雷达SLAM 崔明月, 钟仕鹏, 刘思瑶, 李博洋, 吴成昊, 黄凯 .....	0218

# 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 Jiabin, 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

# 序 言

自动驾驶技术作为未来汽车发展的重要前沿方向,涵盖了自动控制、计算机科学、通信技术、人工智能和车辆工程等技术领域,可以有效减少因驾驶员疲劳和失误而造成的交通事故,同时在缓解交通拥堵、提高交通效率、降低能耗等方面拥有巨大潜能。因此,自动驾驶技术与应用成为各国的研发热点。2009年至2020年,国家自然科学基金委连续举办了十二届“中国智能车未来挑战赛”,该比赛是我国创办最早、持续时间最长的自动驾驶赛事,积极评估和推进智能交通、车联网和无人驾驶领域的技术发展水平。2020年2月,国家发改委、中央网信办、科技部和工信部等十一部门联合印发《智能汽车创新发展战略》,明确指出加快推进智能汽车创新发展。

自动驾驶是一门集环境感知、智能决策、路径规划和车辆控制等众多技术的交叉学科,随着人工智能技术的快速发展,有望推动自动驾驶技术及应用落地的快速变革。目前,自动驾驶围绕货运、物流、矿山、港口和园区等场景的商业应用已取得显著进展,然而,要实现自动化驾驶汽车在公开道路上的大规模应用落地,仍需解决自动驾驶技术中的单车智能缺陷、车路协同的多智能体技术应用困局、L4级(高度自动化)和L5级(完全自动化)的技术瓶颈等问题。

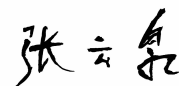
《中国图象图形学报》策划出版的“自动驾驶技术与应用”专刊,邀请业内专家共同组织,收录国内学者在自动驾驶技术与应用领域具有创新性和突破性的研究成果。本期专刊征文得到了所选专题相关研究领域专家和学者的热烈响应,为本专刊提供了丰富的优质稿源,集中反映了研究团队的交叉性、研究主题的广泛性和研究成果的前沿性。本期收录的稿件包括:依据长期科研经验撰写的领域综述;针对最新研究和未来发展撰写的前沿进展,追根溯源、洞察未来;以及来自不同细分邻域的最新探索,提供多元化的科研成果。

我们期待广大读者和科技人员通过本期“自动驾驶技术与应用”专刊,能够更深入、更全面地了解该领域的最新技术和应用,有更多学者参与相关研究,产生具有国际影响力的优秀成果,为领域发展做出新的贡献。

专刊主编



中国科学院自动化研究所 研究员



中国科学院计算技术研究所 研究员

# 编者按

为了促进我国自动驾驶领域的发展,及时反映学术界和产业界在自动驾驶技术与应用领域的最新研究进展,《中国图象图形学报》邀请长期深耕该领域的知名学者、一线科研人员和青年学者,围绕自动驾驶控制、高精地图、场景感知、平行驾驶等方面的技术创新和落地应用展开研究,并形成该专刊。经过严格的评审和修订,“自动驾驶技术与应用”专刊共收录学术论文 20 篇,包括 5 篇“综述”、2 篇“平行驾驶”论文、7 篇“目标检测与跟踪”论文、4 篇“自动驾驶场景感知与仿真”论文和 2 篇“高精地图构建与 SLAM”论文。

“综述”栏目中,《面向智能驾驶测试的仿真场景构建技术综述》系统阐述了国内外面向智能驾驶测试的仿真场景构建技术的研究现状,并对该领域进行了前瞻性探索;《自动驾驶软件测试技术研究综述》讨论了面向自动驾驶系统的仿真测试、实景测试以及面向组件的测试技术,总结分析了面临的挑战并展望未来研究方向;《强化学习的自动驾驶控制技术研究进展》重点阐述了强化学习在自动驾驶控制领域的研究现状、困难和挑战;《自动驾驶地图的数据标准比较研究》介绍了国内外主流的自动驾驶地图数据标准,并总结出数据标准编制时建议遵循的原则;《视觉感知的端到端自动驾驶运动规划综述》详细介绍了该领域的代表性方法及优缺点,列举了相关数据集和仿真平台,并展望了发展趋势。

“平行驾驶”栏目中,《面向智能驾驶的平行视觉感知:基本概念、框架与应用》和《平行视觉的基本框架与关键算法》针对复杂条件下智能驾驶视觉感知问题,将平行智能原创性地引入智能车感知领域,提出了平行视觉感知方法和技术。

“目标检测与跟踪”栏目中,《自动驾驶场景的尺度感知实时行人检测》设计的尺度注意力并行检测算法在 2020 年中国智能汽车大赛的安全避障环节取得优异成绩;《实时视觉目标跟踪与视频对象分割多任务框架》所提出的框架对多尺度目标的分割能力更强、鲁棒性更好;《提升预测框定位稳定性的视频目标检测》从非极大值抑制和前后帧信息关联两个角度设计相关策略;《道路结构特征下的车道线智能检测》结合了视觉信息与空间分布关系,以提高复杂环境下的车道线检测能力;《适用全速域大曲率路径的自动驾驶跟踪算法》可以实现全速域、大曲率的路径稳定跟踪;《伪 3D 卷积神经网络与注意力机制结合的疲劳驾驶检测》和《基于眼部自商图—梯度图共生矩阵的疲劳驾驶检测》分别基于面部和眼部图像,进行驾驶员疲劳检测。

“自动驾驶场景感知与仿真”栏目中,《结合局部平面参数预测的无监督单目图像深度估计》旨在解决无监督单目深度估计易陷入局部极小值的问题;《深度纯追随的拟人化无人驾驶转向控制模型》使得无人驾驶汽车的转向行为更贴近人类驾驶行为;《Edge-guided GAN:边界信息引导的深度图像修复》以图像边界信息为修复的约束条件进行特征提取;《引入概率分布的深度神经网络贪婪剪枝》旨在解决深度神经网络剪枝的不确定性问题。

“高精地图构建与 SLAM”栏目中,《开放道路中匹配高精度地图的在线相机外参标定》提出相机地图匹配的外参自校正方法;《利用边缘计算的多车协同激光雷达 SLAM》基于博弈论求解任务调度问题,提出基于边缘计算的协同激光雷达 SLAM 方法。

## 专刊编委:

曹东璞 教授,加拿大滑铁卢大学

鲍泓 教授,北京联合大学

陈龙 教授,中山大学

贾海鹏 高工,中国科学院计算技术研究所

田滨 副研究员,中国科学院自动化研究所