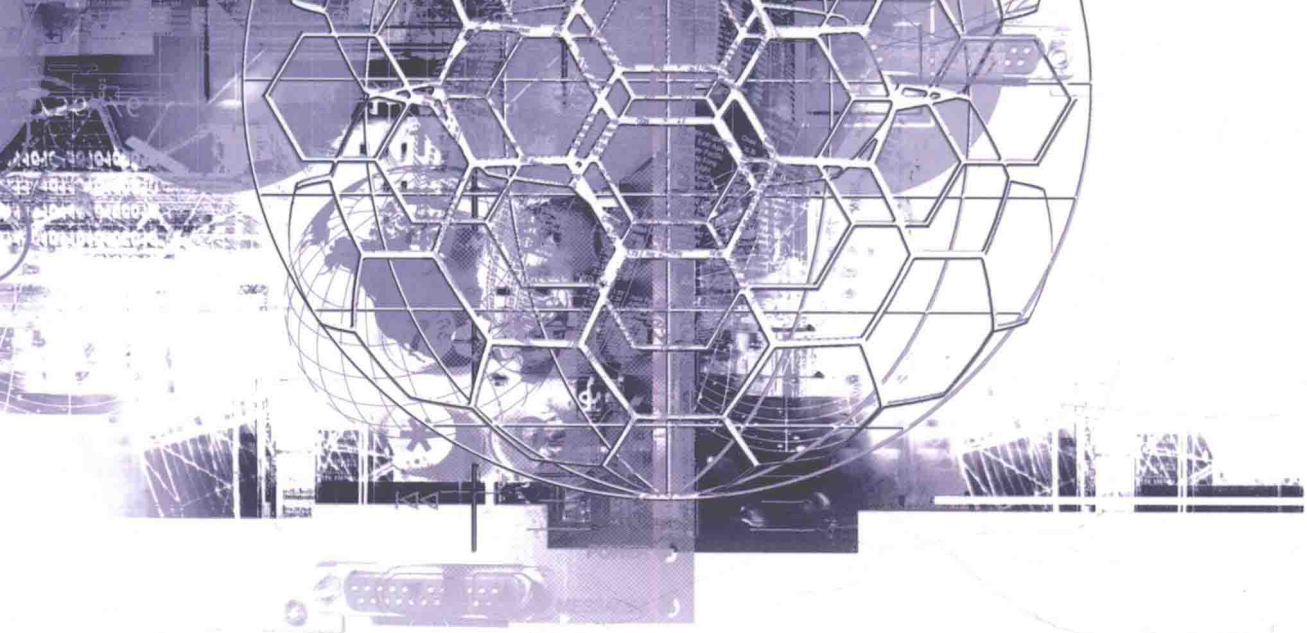




陈宗海 主编

**System
Simulation
Technology & Application**
(Vol. 18)

**系统仿真技术
及其应用**

· 第18卷 ·

中国科学技术大学出版社

系统仿真技术及其应用

• 第 18 卷 •

System Simulation Technology & Application
(Vol. 18)

陈宗海 主编

中国科学技术大学出版社

2017 · 合肥

内 容 简 介

本书为中国自动化学会系统仿真专业委员会联合中国仿真学会仿真技术应用专业委员会主办的“第18届中国系统仿真技术及其应用学术年会(18th CCSSTA 2017)”会议论文集。

本书共收录论文67篇,反映了近年来系统仿真科学与技术在自然科学、社会科学各领域以及航空、航天、石油、化工、能源、国防、轻工等行业中应用的最新成果,以及建模与仿真学、复杂系统新领域等的最新进展。

本书可供科研、设计部门和厂矿企业中系统仿真科学技术的研究和应用人员以及高等学校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

系统仿真技术及其应用. 第18卷/陈宗海主编. —合肥:中国科学技术大学出版社,2017.8
ISBN 978-7-312-04297-3

I. 系… II. 陈… III. 系统仿真—文集 IV. TP391.9-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 181322 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
<http://press.ustc.edu.cn>
<https://zgkxjsdxcs.tmall.com>
印刷 安徽省瑞隆印务有限公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 880 mm×1230 mm 1/16
印张 22.25
字数 908 千
版次 2017 年 8 月第 1 版
印次 2017 年 8 月第 1 次印刷
定价 200.00 元

《系统仿真技术及其应用》编委会

顾 问：李伯虎

主 编：陈宗海

副主编：王正中

编 委：蔡远利 陈春林 陈建华 陈宗海 丛 爽

范文慧 胡 斌 黄元亮 贾连兴 金炜东

金伟新 廖 瑛 毛 征 王正中 张陈斌

写在卷首

“建模与仿真技术同高性能计算一起,正成为继理论研究和实验研究之后,第三种认识改造客观世界的重要手段。”(李伯虎院士)随着计算机、通信、控制等方面高科技的不断发展,大数据、云计算、物联网、车联网等新技术不断涌现,人工智能、虚拟现实等技术获得突破性发展,第三次产业革命的大幕正逐渐拉开,“仿真”这个古老而又年轻的学科更加朝气蓬勃地散发着无限的青春活力。

信息社会化的进程,使得仿真科学与技术面对的是一个丰富多彩的客观世界。信息化和信息社会化,使人类处理的系统规模与复杂性日益增长,人类对系统的认识和研究逐步深化,可利用的信息资源的影响已具有全球化的性质,同时对知识性工作自动化的需求也逐渐迫切起来。这个信息社会化和知识自动化迅猛发展的背景,推动了系统仿真方法学的革新、发展与进步。

近年来,建模与仿真方法学致力于更自然地抽取事物的特征、属性和实现其更直观的映射描述,寻求使模型研究者更自然地参与仿真活动的方法。现阶段的任务主要是依托包括网络、多媒体等在内的计算机技术、通信技术等手段,通过友好的人机界面构造完整的计算机仿真系统,提供强有力的、具有丰富功能的软硬件营造的仿真环境,使开放复杂巨系统的模型研究,从单纯处理数学符号映射的计算机辅助仿真(CAS),到强化包括研究主体(人)在内的具有多维信息空间的映射与处理能力,逐步创建人、信息、计算机融合的智能化、集成化、协调化高度一体的仿真环境,构建信息和物理深度融合的系统(CPS)。可见,信息时代的到来正在孕育着系统仿真科学和技术某些新的突破。正待开发的系统仿真方法和仿真技术广阔无垠,需要我们从事系统仿真的科技工作者付出艰辛的劳动,使仿真这门迄今为止最有效、最经济的综合方法和推动技术进步的战略技术在现代化进程中发挥更大的促进作用。

人类社会已进入 21 世纪的第二个十年,随着云计算、大数据、高速无线通信等信息技术的兴起,信息革命正以“数据化”这一崭新和富有冲击性的形式影响人类生活的方方面面。随着数据获取成本的降低,数据采集精度、数据存储设备的性能和容量的提高,人类社会正在经历一个全面“数据化”的过程,现实的物理世界在数字化的“赛博空间”(Cyberspace)中的投影越来越清晰、越来越丰富,数据正在创造一个新的世界。继物理世界、人的精神世界之后,由计算机、通信、控制等数字化技术构建的“赛博空间”正在成为人类生活中不可或缺的一部分。数据不仅是企业的重要宝藏,也是赛博空间的氧气,离开了数据,人们在未来世界中将无法生存。在赛博空间中,人们不仅可以进行各种社交活动、游戏,也可以进行教育、科研、实验等各种具有创造性的社会活动,赛博空间不应该只有消耗,没有产出。这个世界和物理世界不是割裂的,它是现实世界的部分投影以及人类心灵世界的部分投影。同时,赛博空间也是物理空间与人类精神世界之间的桥梁。仿真科学与技术应该在这一股数据洪流席卷世界的大潮中扮演什么样的角色,是值得所有从事仿真科学工作的研究者共同思考和探讨的问题。

由中国自动化学会系统仿真专业委员会联合中国系统仿真学会仿真技术应用专业委员会主办的“第18届中国系统仿真技术及其应用学术年会(18th CCSSTA 2017)”,共收到论文90篇,录用67篇。其中,大会特邀报告5篇,建模与仿真技术18篇,系统仿真9篇,航天与装备仿真6篇,控制与决策及其他24篇。另有两个专题:灰色定性仿真2篇,大数据与云计算3篇。收录的论文涉及广泛的领域,内容丰富多样,反映了当前学科发展的方向和技术应用的水平。这次学术交流,无疑将对我国系统仿真科学与技术的发展起到积极的推进作用。

编委会

2017年6月于中国科学技术大学

目 录

写在卷首	(i)
------------	-------

第一部分 大会特邀报告

“智能先锋”无人驾驶车辆环境感知技术研究	王智灵,黄俊杰,林玲龙,梁华为(2)
常规兵器试验鉴定力学环境模拟技术研究	赫赤,孙明月,李强,韦志强(8)
Agent-based Simulation of Collective Behavior and QSIM-based Modeling of Catastrophe in Behavior	
..... Hu Bin,Song Yi (13)	
约束条件下基于强化学习的六足机器人步态规划	唐开强,洪俊,留沧海,陈春林(19)
基于线性分式模型高超声速飞行器鲁棒预测控制	唐伟强,龙文堃,蔡远利,蒋红梅(26)

第二部分 建模与仿真方法

基于虚拟样机的级间分离装置设计与仿真分析	曹伟,邢春英(32)
UUV 态势估计计划识别模型	薛昌友,黄峰峰(34)
基于数字样机的可装配性设计方法研究	杨云斌,廖红强,何良莉(37)
The Research on Numerical Simulation of Armour-piercing Warhead Penetration the Target	
..... Huang Jun-qing,Han Kai,Li Guang-hui,Fan Rui (41)	
组织协同行为可靠性建模分析方法	张会,吴思瑾,孙俊忠,李原(45)
基于通用黑板的多 Agent 作战仿真系统建模	陈勇,毛杰(52)
潜艇作战实体认知行为建模研究	吴金平,王永洁,田立业(57)
通信网络抗毁性的作战仿真方法研究	范锐,谭亚新,黄俊卿(62)
基于可变形部件模型人脸检测方法的研究	马玉洁,葛思擘,蔡远利,丁同宝(66)
Battery State-of-Health Prediction through Deep Belief Network	Wang Yu-jie,Chen Zong-hai (70)
质子交换膜燃料电池动态建模与仿真	杨朵,潘瑞,汪玉洁,陈宗海(78)
基于模型的锂电池/超级电容混合储能系统能量效率分析	刘畅,陈宗海(83)
基于电池荷电状态的直流微电网母线电压下垂控制方法	孙韩,董广忠,张陈斌,陈宗海(87)
基于粒子群算法的微电网经济调度研究	于晓玮,张陈斌,董广忠,陈宗海(92)
A Study on Equalization Strategy in Battery Management Systems ...	Zhang Xu,Wang Yu-jie,Chen Zong-hai (97)
质子交换膜燃料电池建模方法研究综述	潘瑞,杨朵,陈宗海(101)
隔震结构爆炸冲击作用下的动力分析及倒塌过程仿真	杜永峰,曾晓虹(106)

微观尺度高速流体的数值模拟与实验分析	陈睿杨,黄璞,杜江峰 (112)
--------------------------	------------------

第三部分 系 统 仿 真

一种用于航天器仿真的通用多平台架构	刘东,闫雪飞,刘德生,李强,张睿 (119)
基于遗传算法的反舰导弹航路规划三维仿真系统设计研究	王永洁,董汉权,刘剑 (122)
多体系结构仿真系统的时间管理问题研究	张翔,李革,王鹏 (126)
三级同步发电机硬件在环仿真	梁铜川,王显承,邹毅军,李鸿彪,王智慧 (132)
卫星对空间目标的凝视仿真	薛高雄,廖瑛,杜鑫 (138)
并行仿真中 CSS 技术研究	王学慧,张磊 (142)
网络舆论传播仿真研究	金伟新 (146)
基于 HLA 的通用航天测控故障仿真系统研究	苗毅,王磊,杨健,黄钊 (156)
基于战场态势的导调控制仿真系统研究	朱英浩 (162)

第四部分 航 天 与 装 备 仿 真

干扰下机载轰炸雷达效能评估的建模和仿真	朱莹,朱立新,杨晋辉 (167)
空间飞行器位置控制器优化设计与仿真	陈晓波,张振宇 (171)
基于 DoDAF 的卫星通信系统作战应用体系结构建模研究	简平,郭琳,熊伟 (175)
C ⁴ ISR 装备体系对抗仿真试验研究	李玉萍,张桂林 (180)
无人机对地攻击仿真试验平台设计与实现	王超,董彦非,岳源,屈高敏 (185)
近程防空反导火炮武器系统试验仿真技术	毛征,张晨,杨俊强,张广申,王朋月 (191)

第五部分 控 制 与 决 策

一种基于模糊综合评判的潜艇海战场目标编群方法	薛昌友,黄峰峰 (199)
一种基于模糊聚类的作战模拟训练效果评估方法	王鹏,李革,张翔,黄柯棣 (203)
超像素图像分割算法研究综述	刘仲民,王阳,胡文瑾 (208)
基于泡利测量的量子本征态估计最优测量配置集的构造方法	郑凯,杨靖北,丛爽 (216)
基于 KNN 状态识别器的图像识别方法研究	张志强,乃永强,杨清宇,蔡远利 (220)
基于干扰观测器和 SDRE 的小型无人直升机姿态控制	瞿友杰,陈谋 (225)
基于粒子群算法的无人机俯仰控制器参数寻优	强明辉,把翠芳 (230)
多导弹三维编队滑模控制器设计	高海燕,周丽婷,蔡远利 (234)
基于边缘梯度密度聚类的区域主方向识别方法	包鹏,张启彬,王纪凯,陈宗海 (238)
离散工业自动化工作站层组态软件平台的研发	简晟,石然,楼云江 (242)

武器装备效能评估指标体系研究	苏建刚,杨若璋,余文广,王青伟 (247)
用于约束多目标优化问题求解的改进 NSGA-II 算法	李二超,李海珍,杨秀平 (251)
道路模拟试验系统路谱复现控制技术研究	韦宏强,郑屹,张鹏,张玉忠 (255)
室内环境 SLAM 过程中动态目标的检测与消除	葛振华,王纪凯,王鹏,张启彬,陈宗海 (259)
动态场景下基于稠密场景流的运动目标检测	戴德云,王纪凯,葛振华,包鹏,陈宗海 (266)
基于不确定性分析的扫描匹配定位方法	张启彬,王鹏,包鹏,王纪凯,陈宗海 (271)
基于低频信号注入法的电动汽车绝缘监测仪硬件设计与研究	田佳强,李锡云,汪玉洁,陈宗海 (275)
深度卷积对抗生成网络综述	洪洋,葛振华,王纪凯,包鹏,张启彬,陈宗海 (279)
一种电动汽车绝缘检测方法的研究	李锡云,田佳强,汪玉洁,陈宗海 (284)
轨道交通故障诊断综述	徐可,张陈斌,陈宗海 (288)
基于双向反激式变压器的锂离子电池组主动均衡系统设计	沈镇,张陈斌,陈宗海,董广忠,魏婧雯 (294)
基于固体火箭发动机的月球软着陆主减速段制导律设计	杨源,郭嘉,荆武兴,万自明,武立军 (299)
基于数据分析的专家权重确定方法	陈建华,李刚强,文家焱 (305)
高速机动目标拦截攻击角度约束导引律	王斌,张金鹏,雷虎民,王业兴,庞策 (309)

第六部分 灰色定性仿真

不确定性分析技术研究	黄元亮 (318)
A Grey System Theory Based Mobile Robot Localization Algorithm	
.....	Wang Ji-kai, Wang Peng, Chen Zong-hai (324)

第七部分 大数据与云计算

基于 BP 神经网络与遗传算法的云存储信息安全风险评估研究	孔岩峰,贾连兴,张江 (330)
基于数据挖掘的装备效能验证与评估方法	汪洲,胡会东 (333)
大数据科研与实训仿真平台在高校的实践分析:大数据平台场景化应用分析	郭琨,彭耀,叶小明 (337)

第一部分

大会特邀报告

“智能先锋”无人驾驶车辆环境感知技术研究

王智灵, 黄俊杰, 林玲龙, 梁华为

(中国科学院合肥物质科学研究院应用技术研究所, 安徽合肥, 中国, 230088)

摘要:无人驾驶车辆是智能信息处理的理想平台、国防建设的重要装备、未来出行的交通工具, 受到广大科研机构和汽车企业的高度关注。环境感知是无人驾驶车辆自主行驶和自主执行任务的前提。本文首先对无人车感知技术的现状和发展趋势进行了分析; 然后以“智能先锋”无人驾驶车辆为对象, 对无人驾驶车辆环境感知的传感系统和交通要素检测技术进行剖析, 并重点分析了无人驾驶车辆在行驶过程中面临的几个难点问题: 面向未知的道路环境、面向未知的交通参与者、面向选道行驶的高精度定位等, 阐述“智能先锋”无人车的感知建模策略, 并给出实际的验证结果。

关键词:无人驾驶车辆; 环境感知; 智能先锋; 多信息融合

中图分类号: TP391

Research on Environment Perception Technology of Unmanned Vehicle—"Intelligent Pioneer"

Wang Zhi-ling, Huang Jun-jie, Lin Ling-long, Liang Hua-wei

(Institute of Applied Technology, Hefei Institutes of Physical Science, C. A. S., Hefei, Anhui, 230088)

Abstract: Unmanned vehicle is an ideal platform for intelligent information processing, an important equipment for national defense construction, and a means of transportation in the future. It has received great attention from scientific research institutions and automobile enterprises. Environmental perception is a prerequisite for unmanned vehicles to run independently and to perform their own tasks. This paper firstly analyzes the status quo and development trend of unmanned vehicle perception technology. And then taking the "intelligent pioneer" unmanned vehicle as the object, the sensor system and the traffic factor detection technology of the unmanned vehicle environment are analyzed. This paper focuses on a few difficult problems encountered in the process of unmanned vehicle running. They are the problems of unknown road environment, unknown traffic participants, the high precision positioning of road-select and so on. This paper illustrates the strategies of perception modeling of "intelligent pioneer", and shows the real verification results.

Keywords: Unmanned Vehicle; Environment Perception; Intelligent Pioneer; Multi-information Fusion

1 引言

无人驾驶车辆以其自主性和安全性成为了当前研究

的热点。在 2004~2007 年, 美国 DARPA 分别以伊拉克战争和阿富汗战争需求为背景, 举办了三届无人车挑战赛^[1], 一次城市挑战赛, 两次沙漠挑战赛。此后, 其相关技术和成果在伊拉克战争和阿富汗战争中迅速得到了大量的应用。谷歌进一步引领了这项研究, 在谷歌地图和街景的基础上建立了虚拟城市, 绘制了无人车将要走过的每条道路, 甚至精确到每个路牙的高度和宽度, 谷歌无人车现在已经完成了超过 200 万公里的自主行驶路测。

我国国家自然科学基金委主办的“中国智能车未来挑战赛(Future Challenge, FC)”和总装备部主办的“跨越险阻地面无人平台挑战赛”极大地推动了国内无人驾驶车辆关

作者简介:王智灵(1983—), 男, 湖南邵东人, 研究员, 中国自动化学会系统仿真专业委员会委员, 主要研究方向为无人驾驶技术、环境感知技术, 文章通讯作者: zlwang@hfcas.ac.cn; 黄俊杰(1984—), 女, 河南濮阳人, 博士, 主要研究方向为图像处理、机器视觉; 林玲龙(1988—), 男, 安徽怀宁人, 助理研究员, 主要研究方向为环境感知技术、机器视觉; 梁华为(1967—), 男, 安徽合肥人, 研究员, 主要研究方向为智能车、检测技术与自动化装置。

基金支持:国家自然科学基金重大研究计划集成项目(91320301)。

键技术与平台的研究。国家自然科学基金委“视听觉信息的认知计算”重大研究计划,以无人驾驶车辆作为重要验证平台开展视听觉信息认知计算理论与方法的研究,从2009年开始连续举办“中国智能车未来挑战赛”,着重考核参赛车辆的4S性能,即安全——Safety、智能——Smartness、平稳——Smoothness和速度——Speed。2014年和2016年,总装备部举办了“跨越险阻地面无人平台挑战赛”,重点关注无人驾驶车辆在典型地面战场地形、地物环境中的自主行驶能力,提出未来地面无人平台的发展需求。

在这些项目和比赛的推动下,我国无人驾驶车辆技术已取得了长足的发展。国防科技大学、中国科学院合肥物质科学研究院、军事交通学院、清华大学、北京理工大学、南京理工大学等高校和科研院所发展了各自的研究成果。目前已有的无人车已经可实现车道保持、车辆避障、跟车行驶等功能,遇到终点线能够自动停车,具有初步的环境感知、路径规划、行为决策能力。

在未来的无人驾驶研究中,智能感知仍将是这项研究中的关键核心所在:

(1) 多信息融合的环境感知、理解和认知技术。仅仅对车道线、道路边界、交通灯等交通要素的检测难以满足开放式环境的需求,多信息融合是提高性能的有效方式。比如,国防科技大学的赵大伟^[3]等人提出一种基于视觉的快速路沿检测方法,并依据检测到的路沿分别生成全局地图和局部地图,然后再使用路沿地图在贝叶斯框架中进行定位,实现高效路沿检测和车辆定位;北京大学的赵卉菁^[4]等将GPS信号和车辆运动控制信号与同步定位及地图创建算法相结合,并对环境中的动态障碍物进行了检测与跟踪,提高了环境模型的准确性。研究融合多信息的环境建模方法以提高模型的准确性、精确性和鲁棒性,实现无人车对整体环境的自动理解和行为的智能决策是未来必须攻克的关键技术。

(2) 面向半结构化和非结构化场景的自主感知技术。一些特殊的常见场景给无人车自主行驶出了难题,已经有研究者开始这方面的尝试。卡尔斯鲁理工学院的Jan Oberlander^[6]提出了一种语义导航技术,该技术可以从传感器数据中抽取出语义信息,结合概念上的环境语义地图,实现语义定位,为车辆在停车场等环境下导航。奥迪集团的Marvin Raaijmakers^[7]提出一种描述环岛几何信息的模型以及一种计算环岛模型参数的感知系统,在无需精确GPS定位和附加道路标记的情况下就能通过环岛。而在实际的开放道路中,包括环岛、停车场、收费站等这些半结构化的、非结构化的区域可能实际距离不长,但却是全程驾驶任务中不可避免的难度所在。

(3) 结合车联网的网联感知技术。“感知总是不完美的。”在实际应用过程中,通过通信方式提高环境感知的可靠性,实现视距外感知是未来发展的方向之一。西班牙国家研究委员会的Vicente Milanés^[5]等人提出一种在高速公路上实现自动驾驶的方法,通过引导车辆实时地生成地图,再由车-车通信的方式传输给无人车辆,实现自动驾

驶。结合车联网的无人驾驶技术,可以在一些特定的应用中发挥巨大的作用。

(4) 低成本化的自动驾驶感知技术。近年来,受到国家政策引导及市场需求推动的影响,国内各大汽车企业、IT企业纷纷参与到自动驾驶汽车的浪潮中。包括一汽、上汽、广汽、江淮等在内的国内多家主机厂,均与研究机构共同合作,开发各自品牌的自动驾驶汽车。不过,这一波浪潮影响的主要是乘用车,特别是电动乘用车。智能化和电动化的结合成为业内看好的发展方向。在国外,宝马、奔驰、奥迪、福特等各自推出了辅助驾驶或者智能驾驶开发计划和样车。传统的无人驾驶依赖昂贵的传感手段,例如,64线激光雷达价值超过50万,高精度惯导价值超过20万,这些传感器的使用限制了无人驾驶技术的大规模推广。逐渐使用更低成本的传感器,或者使用一次性投入而不是重复性投入的感知方式,而保持感知的精度和有效性,提出低成本化的自动驾驶技术,是未来的一个发展方向。

中国科学院合肥物质科学研究院研制的“智能先锋”无人驾驶汽车^[2],连续参与了国家自然科学基金委主办的“中国智能车未来挑战赛”(FC),均表现优秀,其自主能力和智能水平也逐年提高。在2013年的FC大赛的16 km城郊道路行驶赛事中,以不到25 min的时间完成了全路段的自主行驶并无干预完成了全部自主任务,获得该项赛事的第一名;在2014年的“跨越险阻”障碍赛中,顺利完成全部避障任务,包括各类正障碍、负障碍、水坑和运动障碍;在2015年的FC大赛中,实现了“左转进左道、右转进右道、直行进直行道”的选道行驶和依红绿灯指示行驶等遵守交通规则自主行驶,自主行驶综合素质大幅提高。

本文介绍“智能先锋”无人驾驶车辆的体系设计和实现方式,聚焦于智能性的设计与实现,阐述“智能先锋”无人车在环境感知方面的研究和所取得的效果,分析其中的难点和解决方案,并对实际环境中的验证结果进行分析。

2 “智能先锋”无人车环境感知系统

人类驾驶员是一个客观存在的、智能化的汽车自动驾驶范例。借鉴人类驾驶员的经验,构建无人驾驶车辆的环境感知、智能决策、自主控制系统。“智能先锋”无人驾驶车辆建立了分层递阶式的开放式体系结构,明确了各阶子系统的输入和输出,具有良好的接口方式,便于模块化管理和完善,如图1所示。

图1(a)是智能先锋无人车;图1(b)是智能先锋的体系结构设计。从图1(b)可以看出,智能先锋的感知系统接收来自各传感器的信息,建立环境模型,形成栅格地图并传递给决策系统;决策系统基于任务、知识和栅格地图,生成无人车自主行驶的轨迹,发送给控制系统;控制系统将轨迹解析为合理的油门、方向和制动指令,由执行系统执行。关于“智能先锋”感知—决策—控制—执行等系统更多的介绍可以参见文献[2],而本文聚焦于无人车对智能性的需求、设计和实现,重点对智能感知系统进行分析。

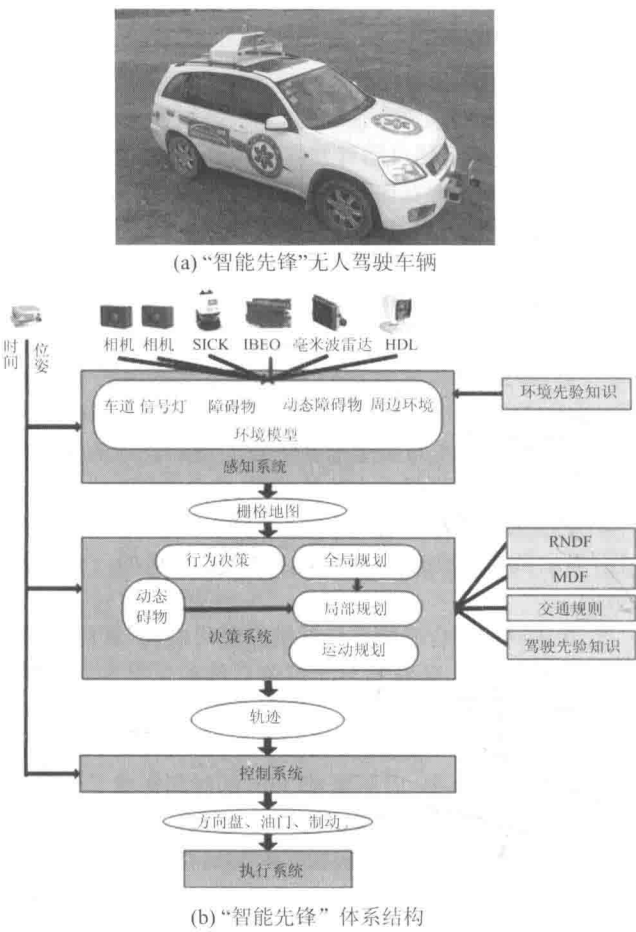


图1 “智能先锋”无人驾驶车辆

在我们的设计中,“智能先锋”的感知系统包括了“感觉”和“认知”两个方面。通过可见光视觉、单线扫描激光雷达、多线扫描激光雷达、惯导定位装置等多种传感器信息,获得对车道线、交通灯、交通标志、静止障碍物、其他运动车辆、本车姿态等环境要素的实时检测结果,是无人车“感觉”环境信息的基本过程;而融合多传感器信息、历史结果、环境先验知识,形成对环境要素的理解和风险的评估,通过融合校正,生成准确的环境模型,是无人车“认知”周围环境的最终结果。在这里,环境先验知识,通常表现为预先生成的地图、拓扑或者属性信息;历史结果则是在过去一段时间内建立的连续的环境模型。

智能先锋使用的主要传感配置方式如表 1 所示。

表 1 “智能先锋”无人车传感器配置

序号	传感器类型	安装位置	传感器功能
1	激光雷达(64 或 32 或 16 线)	车顶正中	无人车周边 360°感知
2	毫米波雷达 (ESR)	车前正中	无人车前方的车辆、行人等障碍
3	毫米波雷达 (RSDS)	车辆两侧侧后	无人车换道辅助

续表

序号	传感器类型	安装位置	传感器功能
4	可见光相机(短焦距)	车顶前向俯视	无人车前方道路、车道线、行人、车辆
5	可见光相机(长焦距)	车顶前向俯视	无人车前方红绿灯、空中的交通标志牌
6	卫星信号(GPS 或北斗)	车内中轴线	无人车经纬度位置及车速
7	陀螺仪(惯导)	车内中轴线	无人车俯仰、横滚、侧翻姿态参数

3 典型交通要素感知技术

3.1 车道线感知

针对真实道路的多样性,采用自适应二值化、检测点聚类、样条曲线拟合以及结合基于道路模型的约束等一系列改进算法,实现了多种复杂情况下的车道线检测与识别。在车道线模型的支持下,依据视觉停留原理,对当前图像进行跟踪,提高了车道线的检测效率和抗干扰性能。典型的车道线检测结果如图 2 所示。

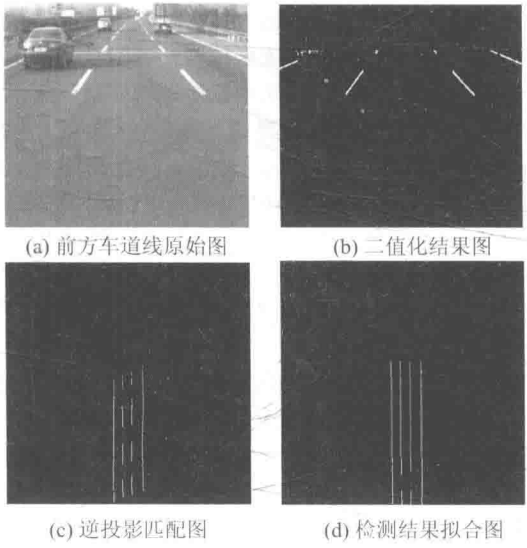


图2 “智能先锋”车道线检测

3.2 车辆检测

车辆是无人驾驶车辆路上的主要交互对象之一,当前对车辆检测的主要方法有三种:① 在激光雷达和毫米波雷达图像中,将其作为障碍物进行检测并给出距离估计;② 在视觉图像中,采用 Hog 特征和色彩特征组合进行检测,采用 SVM 或者 Adboost 分类器进行分类,这种方法对车辆特征整体出现在图像中时有较好的效果;③ 在视觉图像中,通过深度学习进行车辆检测,这种方法需要大量的数据样本,具有很好的检测效果。图 3 给出了采用 SSD 神经网络后“智能先锋”对园区内车辆的检测结果,并同时

给出了对检测结果的置信概率。

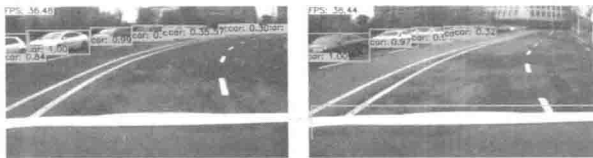


图3 “智能先锋”车辆检测结果

3.3 道路感知

融合基于视觉的车道线检测方法、基于激光雷达的障碍和边界检测算法获得道路感知结果。通过获取激光雷达数据4-邻域的梯度变化极值,解决激光雷达俯仰及侧倾导致的障碍物“虚警”现象;将离散图像的闭合区域搜索算法引入到激光雷达数据处理中,增强了路牙检测的鲁棒性及抗干扰能力。融合车道线、障碍物和边界,给出无人车所处道路的环境模型的典型的道路检测结果如图4所示。

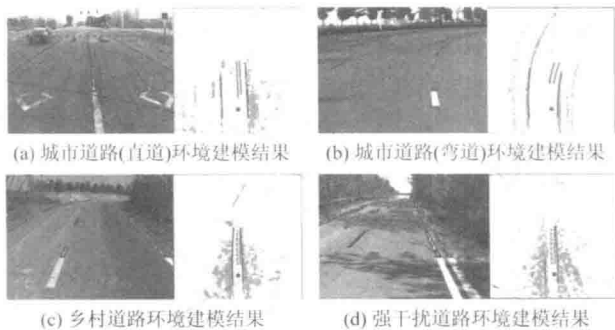


图4 不同场景的道路感知结果

图4中,每一组图的左图给出了车载视觉信息的原始结果和感兴趣区域选择结果,右图给出了道路边界估计、障碍物估计、车道线估计、行驶线估计、无人车本身位置等的建模结果。“智能先锋”可以很好地对城市、乡村道路环境进行建模,并对阴影等干扰有较好的鲁棒性。

4 真实开放式环境感知难点问题处理方法

无人车在行驶过程中不可避免地会遇到未曾采集过的道路、新修建的道路,或者因为某些特殊原因临时开辟的道路,或者环境本身就是未知的,在这些未知道路上如何建立环境理解模型是无人车研究的难点问题;即使在结构化的已知道路环境中,无人车也会遇到未知的交通场景参与者,比如汽车或行人,这些目标的出现和行为均具有较大的不确定性,怎样对其行为和轨迹进行合理的预测是另一个难点问题。遵守“左转进左道、右转进右道、直行进直行道”的选道行驶、“红灯停、绿灯行”的交通灯指示等交通规则是无人车在开放道路行驶时必须具备的智能行为,也是当前无人车研究的难点之一。以选道行驶为例,传统的典型方案是采用“卫星定位加惯导导航”的方式作为无人车的定位依据,而由于卫星定位的误差(无差分误差为米级),导致车辆难以确定自身处于环境中的准确位置

和状态。另一方面,基于视觉的车道保持功能往往对车道线清晰程度要求较高,在实际行驶过程中,由于环境的不确定性、其他车辆遮挡或者干扰等原因失效。这些因素造成了无人车在自主行驶过程中对整条道路的占有权要求较高,难以真正按照选道行驶的方式行驶。多信息融合是“智能先锋”面对这些复杂工况难点问题时的有效处理方案。

4.1 未知的道路环境

智能先锋以视觉和雷达实时检测道路中的车道线和道路边界,结合历史信息构建环境模型。结合历史卫星定位信息和关键点匹配机制,基于连续性假设,将实时检测数据与历史模型相结合,将多幅视野较小的车道线和路沿数据融合成一幅更大视野的道路模型,提高模型的稳定性。

FC2015 大赛中的越野路段行驶任务就是一个很好的例子。如图5(a)所示,其中红色*框线标出的草地区域在赛前被临时开辟了一条蜿蜒曲折坑洼不平的土路,图5(b)是基于雷达信息和历史信息建立的该区域真实状态的融合结果,可以明显看出该区域中新增的弯曲道路边界。“智能先锋”融合视觉检测的车道线信息、雷达检测的障碍信息、历史信息等建立实际环境模型,如图5(c)所示。为便于观察,在图5(b)和图5(c)中,将雷达融合结果与环境建模结果投影到谷歌地图中进行对比。图5(d)是“智能先锋”在比赛中自主行驶通过该路段。

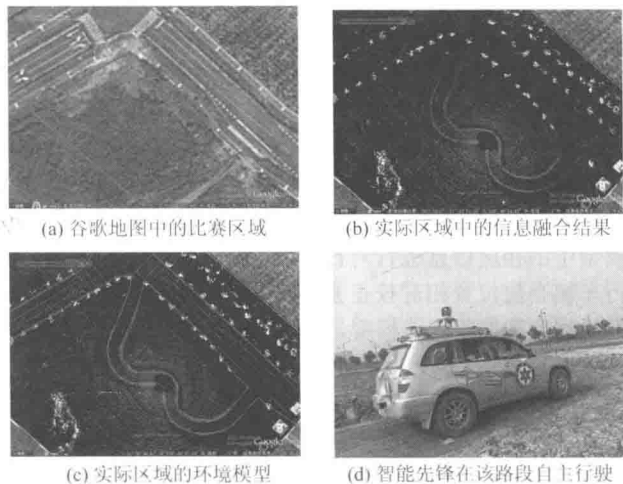


图5 未知越野路段的自主行驶

4.2 未知的道路交通参与者

对于道路上行驶的其他车辆,根据驾驶场景、道路的形状以及其行驶的方向,可以大致分析出其驾驶意图和预计轨迹;而对于交通环境中其他运行的参与者,例如行人、

* 由于本书为黑白印刷,文中出现的所有用颜色表示的图都未能展现出来。敬请谅解!

动物,其运动的不确定性则更高。在对所有的运动障碍物运行轨迹进行了预测之后,还需分析无人驾驶车辆与它们之间的碰撞关系,给无人驾驶车辆的避障过程提供决策依据。针对无人驾驶车辆运动障碍物检测、预测和避障所遇到的问题和系统的设计要求,“智能先锋”融合激光雷达和毫米波雷达的信息,通过构建时空障碍物栅格图,为无人车的行为决策和运动规划提供依据,如图6所示。

对从传感器获得的原始数据,经预处理后将环境中的障碍物区分为运动障碍物和静态障碍物两种,静态障碍物

表示在静态障碍物栅格图上,运动障碍物存储在临时运动障碍物列表中。采用最大关联值法对当前帧栅格地图中的障碍物和动态障碍物列表中的障碍物进行匹配;根据匹配结果求解障碍物运动信息,并更新动态障碍物列表。然后对列表中的运动障碍物位置进行延时校正,并进行碰撞位置预测,采用时空障碍物栅格图描述无人驾驶车辆与周围环境中动、静态障碍物在未来一段时间内的碰撞关系,最终依据这张时空障碍物栅格图进行行为选择和路径规划,完成无人驾驶车辆的运动障碍物避障动作。

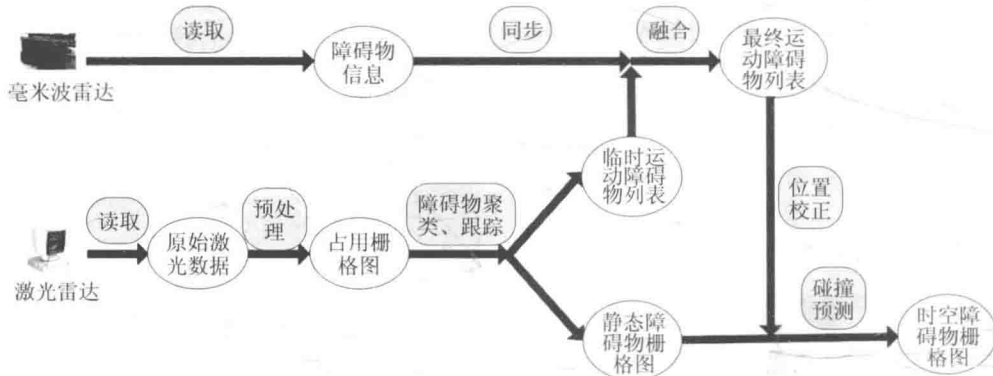


图6 时空障碍物栅格图方法

4.3 多信息融合的高精度定位

要实现真正的选道行驶,就需要在全路段上实现对无人车的高精度定位。为此,需要构建无人车对环境的理解模型,并使用GPS/CPT组合导航获得经纬度作为初步定位信息,对从摄像头实时获取的车道线检测结果和从激光雷达实时获取的边界检测结果进行融合;采用跟踪算法,减少由于光线、遮挡所造成的单帧漏检或误检影响,提高实时检测结果的准确性;通过评估算法,对检测的车道线、边界线的线型、角度、相对关系等进行对比评估,并与历史模型中的相应信息进行对比评估,联立两种评估结果,进行车辆当前位置相对校正量估算,计算当前位置修正量、危险程度和修正置信程度,并根据评估和计算结果对当前位置进行修正,实现精确定位。

图7(a)为车载前视相机的实时检测数据,从图7(a)中可以看出无人车与环境的相对位置。图7(b)为当前时刻无人车对环境的融合建模结果,为无人车车前100 m车后50 m左右各50 m的范围,图中,黄线包围的白色区域和灰色区域分别对应图7(a)中的灌木丛隔离带和黄斜线隔离带,绿色点为融合得到的障碍物信息,其余的竖线分别为车道线和边界线,绿色矩形框代表无人车本身在环境中的位置和朝向。图7(c)和图7(d)对应图7(b)中红色框线选定的区域放大图,其中,图7(c)给出了使用GPS/CPT初步定位信息时车辆在环境中的相对位置,而图7(d)给出了基于车道线、边界线等信息融合校正后的车辆精确定位位置。从图中可以看出,融合校正后,无人车被准确定位到环境中的对应位置上。而通过环境建模和融合校正,可以长时间长路段地保持无人车

的高精度定位。

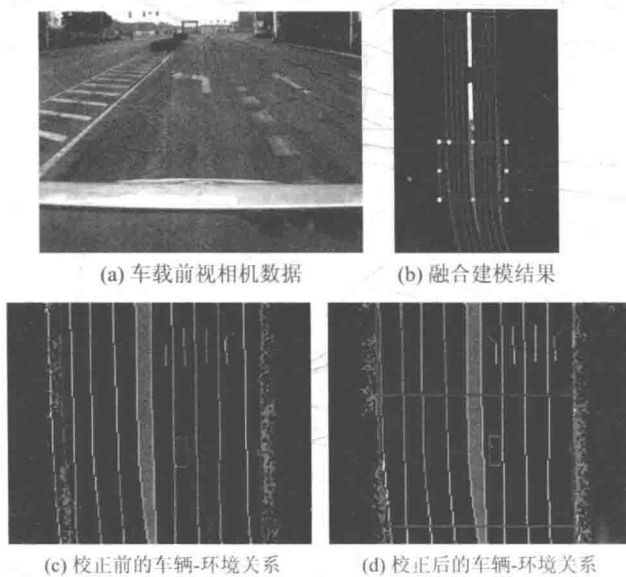


图7 “智能先锋”实时环境建模与高精度定位

5 总结

随着无人驾驶逐渐从可控的结构化环境向不可控的真实开放环境转变,对无人车“智能”性的要求也越来越高。本文介绍了“智能先锋”无人车的体系架构,阐述了“智能先锋”的智能感知方法,解析其中的交通要素检测关键技术,并着重分析了“面向未知环境”“面向未知交通参与者”和“面向选道行驶的高精度定位”等几类难点问题的解决方案,通过实际应用结果验证了这些方法的有效性。

参考文献

- [1] Urmson C, et al. Autonomous driving in urban environments: Boss and the urban challenge[J]. Journal of Field Robotics, 2008,25(8).
- [2] Mei T, Liang H W, Kong B, et al. Development of "Intelligent Pioneer" unmanned vehicle; IEEE conference on. , June 3-7, 2012 [C]//Intelligent Vehicles Symposium (IV), Spain :Alcalá de Henares, 2012.
- [3] Zhao D W, Wu T, Fang Y, et al. Efficient vehicle localization based on road-boundary maps [C]//PRICAI 2014: Trends in Artificial Intelligence. Springer International Publishing, 2014.
- [4] Zhao H J, Chiba M, Shibasaki R, et al. A laser-scanner-based approach toward driving safety and traffic data collection [J]//Journal of Intelligent Transportation Systems, 2009, 10(3).
- [5] Milanés V, Onieva E, Pérez J, et al. An approach to driverless vehicles in highways [C]//Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011 14th International IEEE Conference on. , 2011.
- [6] Oberlander J, Klemm S, Essinger M, et al. A semantic approach to sensor-independent vehicle localization [C]//Intelligent Vehicles Symposium Proceedings. IEEE, 2014.
- [7] Raaijmakers M, Bouzouraa M E. In-vehicle roundabout perception supported by a priori map data, 2015 IEEE 18th International Conference on. [C]//Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2015.

常规兵器试验鉴定力学环境模拟技术研究

赫赤,孙明月,李强,韦志强

(中国白城兵器试验中心,吉林白城,中国,137001)

摘要:本文叙述了常规兵器组成与特点以及定型试验中与力学环境相关的试验项目,分析了目前国内外有关力学环境试验技术的现状与发展,以及国家军用标准对武器系统力学环境试验的相关规定,分别介绍了国家靶场两大类常用的力学环境模拟技术与实现手段,最终探讨了常规兵器力学环境模拟技术的发展方向与重点,给出了国家靶场运用建模仿真技术与方法开展常规兵器定型试验的建议。

关键词:常规兵器;试验鉴定;力学环境;模拟技术

中图分类号:TJ306;TP391.9

Simulation Technology and Application of Mechanical Environment for Conventional Weapon

He Chi, Sun Ming-yue, Li Qiang, Wei Zhi-qiang

(Baicheng Ordnance Test Center of China, Jilin, Baicheng, 137001)

Abstract: In this paper the types and characteristics of conventional weapons and acceptance test items related to the mechanical environment are introduced firstly. Then the status and development of mechanical environment test technologies is presented, as well as the national military standard GJB terms on the mechanical test environment for weapon systems. Two kinds of mechanical environment simulation technologies commonly used in the national test range are shown with their implementation. At last, the paper discusses the developing trend and key issues of the mechanical environment simulation technology for conventional weapons, and gives advice on using modeling and simulation technology in conventional weapon acceptance tests in the national test range.

Keywords: Conventional Weapon; Test and Evaluation; Mechanical Environment; Simulation Technology

1 引言

常规兵器是指除核武器、化学武器、生物武器之外的武器,主要包括作战武器、弹药及辅助装备,通常用于陆地、海洋、空中战场的军事行动中。依据国家军用标准规定,为了考核常规兵器全寿命周期的作战效能与战场适应性能,需要进行一系列试验,主要包括研制试验、作战试验与在役考核试验^[1]。在上述试验中,武器系统性能试验结果主要受三个因素影响:一是武器系统自身性能与质量;

二是武器系统操作使用人员的技术水平与熟练程度;三是被试武器系统所处的环境。

环境^[2]是指在任何时间和地点所存在的或遇到的自然的和诱发的条件的总和。按环境因素属性进行分类,主要包括如下四种基本类型:气候环境(温湿度、气压、雨、雪、冰、霜等);力学环境(振动、冲击、摇摆、恒加速度、爆炸等);生物环境(霉菌、昆虫、海洋生物等);电磁辐射环境(无线电干扰、雷电、电磁场等)。武器系统的定型试验就是在这些环境中进行的,本文重点探讨力学环境及其仿真构建技术与方法。文献^[2]将力学环境试验技术分为六种基本类型:一是振动试验技术;二是冲击与碰撞试验技术;三是离心式恒加速度试验技术;四是摇摆、倾斜与翻倒、弹跳、撞击及自由跌落试验技术;五是综合试验技术(加入温度因素);六是运输包装件力学环境试验技术。前两类是武器系统定型试验中最常见的力学环境试验技术,也是本文讨论的重点。

作者简介:赫赤(1964—),男,黑龙江勃利人,高级工程师,博士,研究方向为常规兵器仿真试验鉴定技术;孙明月(1987—),女,辽宁朝阳人,工程师,硕士,研究方向为建模仿真技术;李强(1977—),男,吉林白城人,工程师,硕士,研究方向为常规兵器试验鉴定技术;韦志强(1985—),男,广西柳州人,工程师,硕士,研究方向为半实物仿真系统设计与应用。