

面向空地一体化交通的虚拟车道:发展阶段与关键技术

李长乐^{1,2},王 硕^{1,2},岳文伟^{1,2},毛国强^{1,2},何祥健³

(1. 西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室,陕西西安710071;

2. 西安电子科技大学智慧交通研究院,陕西西安710071; 3. 悉尼科技大学电子与数据工程学院,澳大利亚新南威尔士州2007)

摘要: 本文提出了一种用于未来自动驾驶场景的虚拟车道技术,旨在突破当前自动驾驶行业的发展瓶颈,并为未来融合飞行汽车交通系统(Flying Car Transportation Systems, FCTS)的自动驾驶场景提供一种创新性技术方案. 虚拟车道技术伴随自动驾驶等级的提升协同发展,从面向有人驾驶,到面向全智能驾驶,再到面向本文所提出的L6空地全域自动驾驶,从而实现空地一体化交通的愿景. 本文结合了自动驾驶、数字孪生、物联网(Internet of Things, IoT)、人工智能(Artificial Intelligence, AI)等各领域的最新技术对虚拟车道技术在每个发展阶段的应用场景和具体实现方法进行了详细介绍以及可行性分析,对自动驾驶行业明晰未来总体发展趋势和关键技术导向具有开创式的启发意义.

关键词: 虚拟车道; 飞行汽车; 自动驾驶; 空地一体化交通; 车路协同; 智能交通系统

中图分类号: U491.2+22; TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2022)05-1255-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20211568

Virtual Lanes for Air-Ground Integrated Transportation Systems: Evolution and Key Techniques

LI Chang-le^{1,2}, WANG Shuo^{1,2}, YUE Wen-wei^{1,2}, MAO Guo-qiang^{1,2}, HE Xiang-jian³

(1. State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. Research Institute of Smart Transportation, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

3. School of Electrical and Data Engineering, University of Technology Sydney, NSW 2007, Australia)

Abstract: Aiming to break through the development bottleneck of the current autonomous driving industry, virtual lanes are proposed to provide an innovative technical solution for future autonomous driving scenarios integrating flying car transportation systems(FCTS). Virtual lanes develop synergistically with the evolution of autonomous driving stage, i.e., from manned driving, to fully intelligent driving, and then to the proposed L6 air-ground full-domain autonomous driving, which can finally achieve the air-ground integrated transportation systems. This paper introduces the application scenarios, implementation methods and feasibility analysis of virtual lanes in each development stage by elaborating the state-of-the-art technologies in autonomous driving, digital twin, internet of things(IoT), artificial intelligence(AI) and other fields. It has a pioneering inspiration significance for the autonomous driving industry to clarify the overall development trend and key technology orientation in the future.

Key words: virtual lanes; flying car; autonomous driving; air-ground integrated transportation; vehicle-road cooperation; intelligent transportation system

1 引言

当今时代,城市经济飞速发展且城市化进程加快,随着大量人口的涌入,市区迎来了日益严峻的交通事

故、道路拥塞、环境污染等社会问题. 而自动驾驶(Autonomous Driving, AD)技术在提高交通系统的通行能力、效率、稳定性和安全性方面有着巨大潜力^[1,2]. 通过

将关键驾驶任务的安全控制转交给系统承担,AD有效避免了人为驾驶失误的出现,显著提升了驾驶安全性^[3],已被纳入未来智慧城市议程中的关键智能出行计划^[4]。

伴随着AD技术的出现,城市交通步入数字信息化时代,而车道作为驾驶环境的基本要素是AD对场景理解的必要信息。美国汽车工程师协会(Society of Automotive Engineers, SAE)根据驾驶员的干预和注意力需求将自动驾驶分为L0至L5六个不同的级别^[5]。目前,高级辅助驾驶系统(Advanced Driver Assistance Systems, ADAS)的实现和量产已将驾驶自动化等级落实到了L2,已实现车道偏离预警、车道保持辅助、车道居中辅助和自动变道辅助等功能^[6-8]。然而,高度不确定的环境因素和部分场景下车道及车道线的不规则是目前车道检测技术的挑战,天气条件、道路状况以及周围车辆和行人的行为都会对实际车道信息的特征提取造成不可避免的干扰^[9,10]。因此,为进一步提升AD的驾驶安全性,在未来的发展中,服务于AD的车道需要突破物理车道标记的限制,应以数字化、信息化、智能化的虚拟车道形式从“车的眼中”而非人的眼中构建。

车道信息是地图数据的一部分。目前,面向自动驾驶的高精度地图具有车道线位置、连接关系、地形和地面纹理等精确的地图数据^[11],不仅能够辅助智能车完成匹配定位,还能帮助智能车实现厘米级的路径规划^[12]。然而,高精地图只是完成了对现实地理环境的数据采集,所提供的车道级别信息源于现实,避免不了受到现实环境的影响。为此,车道信息要在高精地图的物理空间维度之上以虚拟形式进行构建。文献^[13]认为,未来测绘服务领域应从物理空间向多维空间扩展,由面向人服务到面向智能机器人服务的变化发展,其中,以智能车为代表的智能机器人应得到测绘科技的保障和支持,而高精度地图就是构建机器人“心像地图”的数据基础。而这里的多维空间是一个由可视化、虚拟现实、数字孪生、通信技术、移动网络和人工智能诸因素和技术共同支撑下的虚实相融的人类活动新空间^[13]。因此,未来自动驾驶车的虚拟车道将是一种以高精地图三维数据为基础的,在多维空间下所构建的,具有路径规划、自动避障、定位及导航功能的智能虚拟车道,并最终在虚拟现实的形式在人眼中呈现,我们称之为虚拟车道技术。

虚拟车道技术的研究将是未来解决交通拥堵问题的突破口。目前人们已经开发了城市地面、地下、水上和高空用于运输,但公共交通和货物运输依旧承担着巨大的压力,地面道路建设不再满足需求,未来的城市交通建设已将目光投向空中。美国Uber公司早在2018提出了空中出租车UberAir概念^[14],描绘了未来城市按

需服务的空中交通网络构想。飞行汽车已不再是一个新颖的概念,其发展历史可以追溯到上个世纪初^[15,16]。最近,文献^[15]从性能和安全两个角度研究了其内部动力系统架构的设计。文献^[16]总结了目前处于开发阶段的23种飞行汽车原型,按起降模式可分为水平起降(Horizontal Take-Off and Landing, HTOL)和垂直起降(Vertical Take-Off and Landing, VTOL)两种类型,其中采用VTOL模式的飞行汽车在城市地区具有更强的适用性。另外,飞行汽车在城市地区的大规模商用除了考虑自身设计和基础设施外,还要考虑飞行汽车交通系统的各方面因素,如通信网络、导航系统、网络安全、城市规划、环境污染、人为因素等^[15-19]。然而,这些现有的著作只从宏观角度总结和讨论了FCTS各方面的难点和技术需求,缺乏针对技术需求的具体实现方案的研究。因此,本文从自动驾驶技术的角度出发,讨论了城市FCTS的发展阶段以及相应的关键技术,就FCTS在城市空域待解决的路径设计和导航问题^[16]提出了具体可行的方案——虚拟车道技术。该技术可在城市空域为飞行汽车构建三维虚拟导航通道,将自动驾驶的系统作用域进一步扩展,实现比L5完全自动化更高维度的L6空地全域自动化。

2 虚拟车道技术的发展阶段

2.1 L6自动驾驶概念

虚拟车道技术的发展不会是一蹴而就的,需要与驾驶自动化等级相匹配并随之演进。而在目前SAE所设立的自动驾驶分级中,系统作用域只考虑了地面空间,最终的L5完全自动化也并非实现真正意义上的全域自动驾驶。由于虚拟车道技术将未来飞行汽车实现自动化设为最终目标,城市空域将被AD充分利用,最终的驾驶自动化将解除物理车道限制,贯穿地面和天空两个领域。因此,如图1所示,我们在SAE指定的自动驾驶等级基础上,提出了最新的L6空地全域自动化的概念,并指出了各自动化等级所处的虚拟车道技术发展阶段。

2.2 虚拟车道的三个发展阶段

根据自动驾驶等级的提升,虚拟车道技术的发展将会经历三个阶段。首先,在L0至L2中,由于自动驾驶系统(Automated Driving System, ADS)只提供轻量级的辅助控制,驾驶操作必须全程由人类负责。因此,为人类驾驶员提供复杂道路环境下的驾驶路径引导是虚拟车道技术在该阶段的主要任务,并称该阶段为虚拟车道的初级阶段。在L3至L5阶段中,车辆驾驶的主导权移交给了ADS,智能车在道路上的渗透率逐步提升,智能驾驶场景便成为虚拟车道技术的主要服务场景,称该阶段为虚拟车道中级阶段。最

AD分级	名称	驾驶操作	功能	系统作用域	虚拟车道技术	
SAE	LEVEL 0	无自动化	无论功能是否启用 都是人类负责驾驶 必须时刻监督 必须根据需要进行转向 制动或加速以保证安全	提供警告和瞬时辅助	部分道路 (地面)	初级阶段
	LEVEL 1	驾驶支持		提供转向或制动加速支持		
	LEVEL 2	部分自动化		提供转向和制动加速支持		
	LEVEL 3	条件自动化	当功能启用时, 系统负责驾驶。请求接管时, 必须人类驾驶。	必须满足要求的条件, 否则无法运行; 交通拥塞驾驶	全道路 (地面)	中级阶段
	LEVEL 4	高度自动化	不会要求人类接管驾驶。	区域无人出租车 无需安装踏板方向盘		
	LEVEL 5	完全自动化	功能同4, 但可在所有条件下运行			
NEW	LEVEL 6	空地全域自动化	全程由系统负责驾驶	包含L5所有功能, 空间级定位和导航	全域 (地面+天空)	高级阶段

图1 L0至L6驾驶自动化等级

后, L6将是虚拟车道技术走向成熟的最终阶段, 此时自动驾驶飞行汽车已经商用, 城市交通迈向“空地一

体化”。图2给出了三个发展阶段的场景图, 下面将作具体介绍。



图2 虚拟车道的三个发展阶段

2.2.1 初级阶段:面向L0-L2的有人驾驶场景

在初级阶段下, 道路上的车辆以人类驾驶车辆为主, 且路面上需要物理车道标志来供驾驶员区分车道。初级的虚拟车道为目前的智慧公路系统^[20], 其数据源于沿车道边缘大规模部署的IoT信标, 能够对行驶车辆及道路本身状态进行数据采集, 并融合高架摄像机、气象设备和路侧雷达对整个路网进行全覆盖感知与检测, 通过“端-边-云”协同计算^[21]为车道上的每辆车提供最优行驶路径。人类驾驶员可以通过车道边缘IoT信标的频闪灯光、路旁屏幕文字、车载通信设备的声音和画面获得最佳行驶方案的提醒, 通过一条潜在的虚拟轨道实现复杂道路场景下的超视距感知和导航。

2.2.2 中级阶段:面向L3-L5的智能驾驶场景

在中级阶段下, 道路上的车以智能驾驶车为主, 车辆的主要驾驶操作权由人类移交给系统, 并且全路网部署的泛在感知系统可以为智能车提供高精地图。每辆智能车根据地图数据生成自己的虚拟车道进行导

航, 并将虚拟的车道数据上传至云端共享, 云端将虚拟的车道数据与真实的环境数据进行结合, 从而实时更新高精地图并再次下发至各各车端。在获得融合了虚拟路网的高精地图数据后, 每辆智能车的虚拟车道会根据其导航路径提供相应的智能速度控制决策以避免整个路网的车辆碰撞和路径冲突。

2.2.3 高级阶段:面向L6空地一体化交通场景

在高级阶段中, 飞行汽车的加入使城市交通空地一体化。自动驾驶车生成的虚拟车道由2D平面变为3D通道, 仅地面部署的感知单元已经不再满足需求, IoT信标需要在高层建筑间垂直覆盖实现全域的泛在感知和空间级高精地图的构建。为充分利用城市空域, 空地一体化交通中的虚拟车道分为分层式结构。在城市空域按高度分为若干层, 且每层可生成若干条虚拟车道, 车道的数量可根据流量自适应调节, 不同层间通过斜坡匝道连通, 路口无需交通信号灯控制。空域中每条虚拟车道会根据周围障碍物进行自适应调整, 不同

车道间会相互协作以达到路网最大通行能力,因此该结构所构成的虚拟路网将是实时动态的。

3 不同发展阶段下的关键技术

3.1 初级阶段

车路协同技术是初级虚拟车道的实现方式,能够以声、光、电等物理信号的形式呈现,用以引导人类驾驶员根据周围环境的状态执行最佳的驾驶操作。如图3所示,车路协同的实现需要依靠沿道路大规模部署的以IoT信标为主的多源传感器系统,实时感知车辆及道路的状态,并利用“端-边-云”多层设备对原始感知数据的特征进行提取,并进一步作本地数据分析及计算。数据计算处理完毕后,对检测到的异常事件以及每辆车需要执行的最佳驾驶动作进行发布。

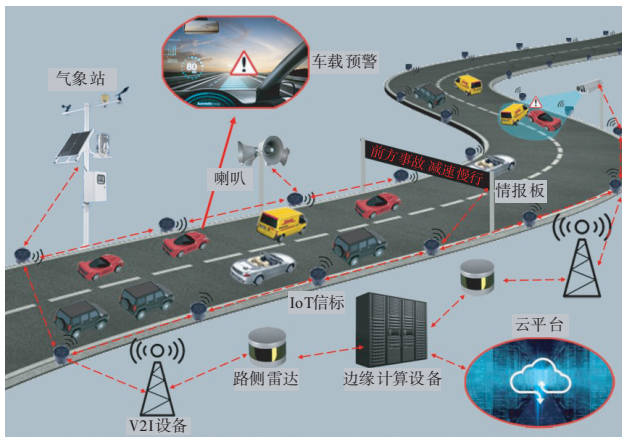


图3 初级虚拟车道的实现方法

3.1.1 路侧设备

路侧设备由IoT信标、摄像头、毫米波雷达以及气象站组成。其中,IoT信标为核心传感器,它是一种集成地磁、温度等多种传感器和LED(Light Emitting Diode)的感知设备,在极端恶劣的环境下拥有很好的可靠性与续航能力^[20]。内置远距离低功耗无线通讯技术并与大数据平台配合,能够实现车辆预警、车流量统计^[22]、车型分类^[23]、车速测量^[24]、IoT信标间通讯、夜晚及恶劣天气下的公路轮廓标显示。架设在道路上方的高清摄像机提取出车辆的车型及车牌号等信息,用于完成后续视频数据与IoT信标检测到的车辆轨迹的关联工作。路侧气象监测站能将环境温度、相对湿度、能见度以及降水降雪等气象信息报告给系统后台,便于后台获得并向道路车辆发布最新的气象信息。

3.1.2 多源融合

传感器数据间的融合包括多IoT信标融合、摄像机与IoT信标融合、摄像机与雷达融合。采用卡尔曼滤波器(Kalman Filter, KF)的数据级融合算法^[25,26]以原始形

式对收集自不同传感器的数据进行融合,可通过观测不断提高估计值^[27],适用于任何状态连续变化的动态系统^[28]。由于KF实现数据关联不需要在内存中保存很多数据,唯一的关键数据是传感器信号的历史状态,适合具有最小系统规范要求的实时应用系统^[29],因此KF可用于对交通状态进行估计的多IoT信标数据融合以及异构传感器数据融合。具体来说,可利用摄像机与雷达的高精度检测数据,与IoT信标设备的信息进行互补,有效获取从不同的环境特征下对道路信息高精度的感知,得到道路和车辆更加完整的数据。

3.1.3 “端-边-云”架构

“端”指路侧感知设备,“边”指边缘计算设备,“云”指云平台。路侧感知设备包括:IoT信标、摄像机、毫米波雷达等。首先,路侧设备将采集到的原始数据信息发送至边缘计算设备。其次,边缘计算设备通过将单个路侧设备采集的数据进行数据关联和融合,获取车流、车型、车速及车牌等信息并对异常事件(如异常停车、逆行等)进行检测。之后,边缘计算设备再将事件信息传输至路侧单元、情报板以及喇叭等发布设备,用于显示或者对路上行驶车辆发送预警信号等后续操作。同时,这些处理后的信息也会发送至云平台进行多个路侧设备的传输数据融合,实现超视距事件发布及处理。

3.1.4 可行性分析

为了验证初级虚拟车道技术的可行性,本文选取真实道路场景进行了户外实验。该初级虚拟车道实验系统的主要方案是利用毫米波雷达和IoT信标辅助视觉。基本思路是将毫米波雷达返回的目标点投影到图像上,围绕该点并结合先验知识,生成一个矩形的感兴趣区域,然后我们只对该区域内进行目标检测。摄像机捕捉车辆经过各IoT设备的图像信息后,再利用对应的真实时间标号将摄像机检测信息与IoT设备检测信息进行数据对齐,以此解决摄像机的漏检或者多检情况。最后,利用毫米波雷达返回的目标的距离、角度、速度信息来进行碰撞时间计算,以实现行人/车辆在预警时间阈值内预警,避免摄像机距离测量及障碍物速度估计不准的问题。以前方存在异常停车的场景为例,实验结果如图4所示,应用初级虚拟车道技术的实验路段可以通过路侧IoT信标、摄像机以及毫米波雷达等多种传感器采集途经车辆的类型、位置、速度、流量等状态信息,“端-边-云”系统进一步对本地数据进行提取、融合和计算,将所得最优策略发布给实验车辆,实验车辆通过内置车载单元接收到了前方停止车辆预警,并被提醒减速慢行以避免碰撞,可见实验实现了车路协同使能的初级虚拟车道技术。

3.2 中级阶段

高精度地图是中级虚拟车道的主要使能技术,如



图4 初级虚拟车道技术用于避免车辆碰撞的实验结果

图5所示,该阶段下的虚拟车道技术不再依托任何物理呈现形式,而是一条基于高精地图数据进行实时导航的虚拟路径.该虚拟导航路径能够通过云端对整个路网的状态进行实时动态调整,并为智能车定制专属的智能速度控制方案以保障虚拟车道上的无拥堵和无碰撞行驶.

3.2.1 高精度地图

高精度地图的信息量和数据质量影响到自动驾驶系统的安全性和可靠性.与传统地图相比,中级虚拟车道依靠的高精度地图不仅提高了地图的精度与信息量(如二维与三维、光栅与矢量、点云图与语义图等),而且结合了全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)、惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)、里程计技术^[30],将现实道路场景中的静态环境元素(道路基础设施、城市建筑物等)以精确数值的形式预先生成在地图空间中.因此,高精度地图扩展了车辆的静态环境感知,再配合单车感知和路侧感知对道路上的动态环境元素(车辆、行人等)的实时检测,从而实现智能车的超视距环境感知和最优路径的超视距规划.

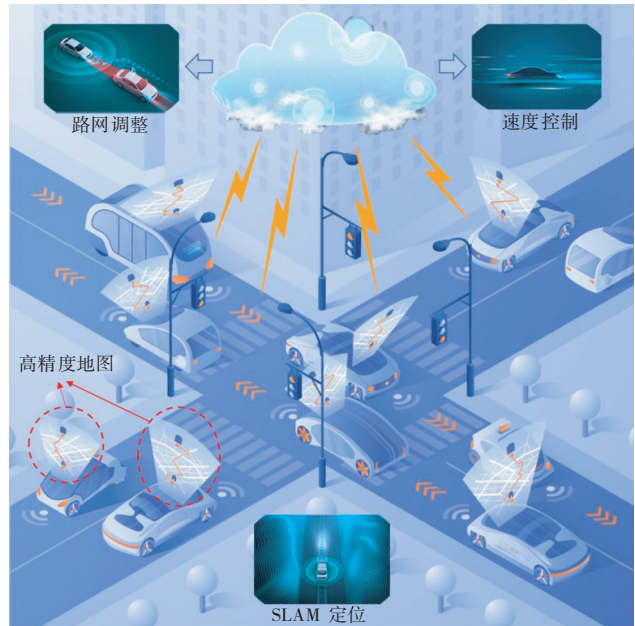


图5 中级虚拟车道的实现方法

3.2.2 定位和导航

精确的车辆定位是中级虚拟车道生成的前提条件.对智能车辆而言,在驾驶过程中需要不断摄入新的

环境信息构建高精度地图,同时根据已有地图和当前场景准确快速判断自身位置,即时定位与地图构建(Simultaneous Localization And Mapping, SLAM)是实现智能车定位与导航的关键技术,主要包括视觉SLAM和激光SLAM^[31].为满足智能车的在复杂环境中定位需求,SLAM技术需融合多种传感器信息,以提升定位精度和对复杂场景变化的鲁棒性.具体而言,智能车利用所携带的视觉、激光等传感器预估当前位置和姿态,通过观察当前地图上的特征点来更新自身位置,并根据当前传感器数据提取环境地图,对环境地图进行更新.基于先验高精地图的SLAM技术可以通过车载传感器获取的点云数据和图像信息与地图上的三维地标信息进行匹配来实现其位置和姿态的精确获取^[32].在此基础上,虚拟车道可根据超视距感知的道路元素,以车辆初始位置和姿态为起点,并融合INS、GNSS以及激光雷达等多源数据^[33],在地图中动态规划出一条由高精度矢量构成的超视距导航路径.

3.2.3 路径规划

为智能车所规划的虚拟路径不仅要保证每辆车都可以安全地从出发地(O)行驶到目的地(D),还要根据行驶距离、行驶时间、燃油成本和污染物排放量等因素在多个O-D路径中选取最优.全网路虚拟路径的动态规划由云端平台进行,每辆车将其初始定义的虚拟路径上传至云端,云端可通过基于模糊逻辑和改进蚁群算法的路径分配机制^[34]对整个路网的虚拟车道进行实时动态规划和宏观路线调整,并为每条虚拟路径制定精确到速度的行驶决策方案,以保障虚拟车道互相在时间和空间上均不存在冲突.随后,结合高精地图数据被重新发布至各各车端,智能车接收后会按照虚拟车道的决策在指定最优路线上进行智能速度控制和避障以实现安全驾驶.

3.2.4 可行性分析

为验证中级虚拟车道技术的可行性,我们使用汽车智能驾驶一体化仿真测试平台PANOSIM^[35]对全智能驾驶场景进行模拟,虚拟车道的定位与导航功能由基于高精度地图的SLAM技术完成,主要分为两步.

首先,SLAM与激光点云信息进行融合.激光雷达实时扫描的点云信息与高精度地图进行匹配,快速获得可靠的定位信息.具体来说,我们采用累积多次扫描点云方法,获得更高密度的地面点云,提升用来匹配的局部地图的信噪比,再通过连续若干帧进行联合优化以抑制不同帧之间由于定位误差积累带来的配准不一致问题.另外,我们采用基于相位相关的方法来提升XY定位算法的精度和鲁棒性.假设图像 f_1 和 f_2 之间的平移变换为:

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0) \quad (1)$$

其中 (x_0, y_0) 为估计平移量,根据傅立叶变换原理,对图

像 f_1 和 f_2 进行转化得到 F 和 F' ,则进一步得到两幅图像间的互功率谱函数为:

$$\frac{F(\xi, \eta)F^*(\xi, \eta)}{|F(\xi, \eta)F^*(\xi, \eta)|} = e^{j2\pi(\xi x_0 + \eta y_0)} \quad (2)$$

最后计算上述结果的傅立叶反函数,结果中最大值出现的位置就是待估计 (x_0, y_0) ,通过插值可以获得亚像素的定位结果.上述 x_0 和 y_0 结合初始的 X 和 Y 可以获得最终的精确的定位结果.

然后,SLAM与视觉信息进行融合.智能汽车利用摄像头检测出车道线信息,同时与高精度地图中的几何信息进行匹配,完成对智能车辆的定位.具体地,先对高精度地图中的车道线信息在图像空间进行采样,获得离散的点,再采用粒子滤波定位方法^[36],成本函数定义为高精度地图上点反投影后最近的图像上检测的车道线上的点的误差:

$$\omega_k^{(i)} = \frac{\exp\left(-\frac{(x_k^{(i)} - x_{\text{enu},k}^{(i)})^2 + (y_k^{(i)} - y_{\text{enu},k}^{(i)})^2}{2\sigma_\omega^2}\right)}{\sqrt{2\pi\sigma_\omega^2}} \quad (3)$$

其中 $\omega_k^{(i)}$ 为车道线 k 上每个点的概率, σ_ω^2 为概率分布的方差, $(x_k^{(i)}, y_k^{(i)})$ 为图像上检测的车道线点的坐标, $(x_{\text{enu},k}^{(i)}, y_{\text{enu},k}^{(i)})$ 为高精度地图上车道线 k 上点 x 通过当前姿态反投影到图像上的点的坐标,每个粒子的权重为所有点概率之和.

实验效果如图6所示,仿真中的智能车利用中利用云端所提供的高精地图数据并通过SLAM定位技术生



图6 中级虚拟车道技术实验效果

成了虚拟车道导航路径,并实现了智能速度控制以及路径调整等功能,从而验证了高精度地图使能的中级虚拟车道技术的可行性。

3.3 高级阶段

高级虚拟车道是一项服务于L6空地全域自动驾驶的三维虚拟通道导航技术,面向未来城市空域资源也被用于交通运输的空地一体化交通场景。如图7所示,该场景首先需要为飞行汽车设计一种有秩序的城市空域交通结构,其次三维导航通道的生成需要实时性更高的数字孪生技术来支撑高精度地图的刷新,最后还应从全域的角度考虑FCTS的数字通信和网络安全等问题。

3.3.1 城市空域交通结构

文献[19]指出,对于飞行汽车的目视飞行规则

(Visual Flight Rules, VFR)预计在高度为距地面0-500英尺的超低空空域实现。因此,假设未来城市空域交通在此高度范围内进行层式结构划分。参考无人机sky-lanes城市空域结构^[37]。该结构下的每条虚拟车道是一个矩形条状空间且只有一辆车的宽度和高度,要求汽车严格按照车道矩形中心线飞行以避免碰撞,允许横向调整车道轨迹,不同层间通过斜坡匝道连接,空中每一层有若干条车道,且同时存在的车道数量可根据流量自适应调节,实现车辆无碰撞、无拥堵的路口通行和层级切换。其中飞行汽车的启用按乘客需求随时分配,定义个性化的临时车道,一定范围内同一时间的所有车道构成实时路网,并随着车辆的加入或退出实时更新。

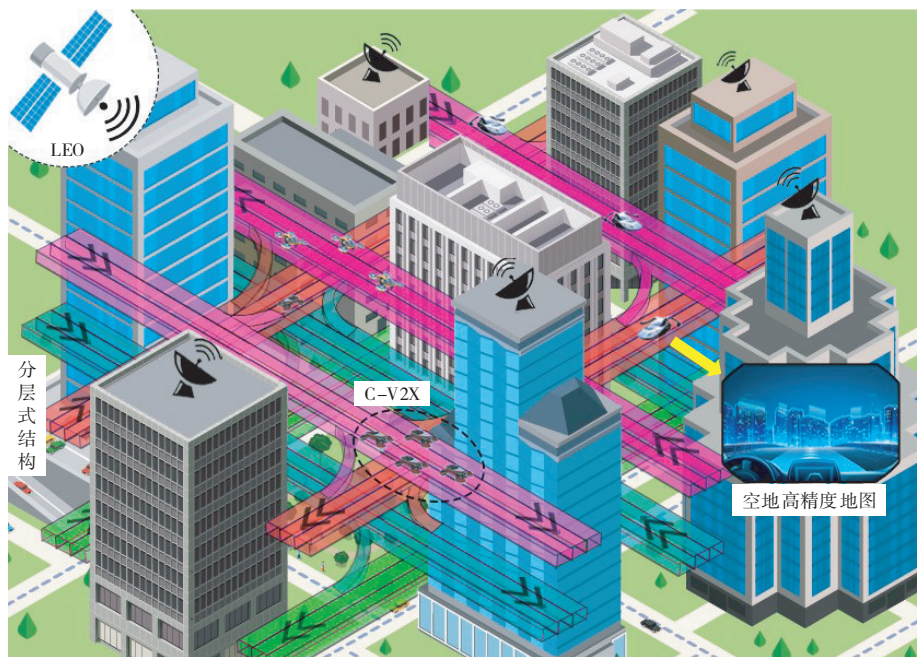


图7 高级虚拟车道的实现方法

3.3.2 空地高精度地图

L6空地全域自动驾驶所配备的高精度地图相比于目前自动驾驶使用的高精度地图,它具有高维性、数字可控性和自适应性的特点。其中,高维性是发展空地一体化交通的前提,高精度地图需要对整个城市采集空间定位信息、地面和高层建筑纹理、空域虚拟车道信息等高维高精度数据以确保空地全域自动驾驶的安全。数字可控性指高精度地图需要数字孪生技术的支持,通过在城市地面道路和高层建筑表面全面覆盖集成多源传感器的IoT信标,以实现全域交通感知、全网数据资源共享以及全方位城市规划可控^[38]。云端的数字孪生平台能够通过AI对实时的交通态势进行数据分析,并对交通拥堵的进行精准预测,及时调整虚拟路网的

车道分布,从而稳定交通流,提升城市全域的通行效率。自适应性是由于高级虚拟车道技术在空域所生成的虚拟路网是实时动态的,因此,高精度地图需要与这些虚拟车道进行实时交互,能够根据变化的虚拟路网连接状态计算并调整地图中的空间地图数据,无需对空间数据进行重新采集以降低成本。

3.3.3 空域车联网

考虑到飞行汽车能够在离地数百米的高度行驶,传统的地面无线通信系统无法做到全高度范围覆盖,空地一体化交通需要铺设更多的空中接入点,如楼层间部署的高空IoT信标可以扩展FCTS的通信范围及辅助位置标定,再配合低轨道(Low Earth Orbit, LEO)卫星通信系统可对虚拟车道进行精确的三维定位^[39]。为此,

车联网通信需要扩展到 FCTS,目前最先进的蜂窝车联网技术(Cellular-Vehicle to Everything, C-V2X)在中国的发展处于世界领先地位^[40]. C-V2X 利用和增强当前的蜂窝移动通信系统,提供了大覆盖、低延迟、高可靠性和高吞吐量的 V2X 通信^[40,41],将其应用于 FCTS 可以有效地提高虚拟车道技术在全域的信息交换和环境感知能力. 虚拟路网的动态调整还需要依靠按需服务网络加以辅助,通过设立分散的 V2I (Vehicle to Infrastructure) 服务站点或利用现有的蜂窝移动基站,为所在范围内的车辆提供调度服务^[42],从而使每辆车能够通过 V2V (Vehicle to Vehicle) 及 V2I 实时共享自己的虚拟路径,有助于云端对整个虚拟路网的动态规划.

3.3.4 6G“空地一体”通信

与 5G 网络相比,第六代无线通信(6G)网络将不再局限于地面通信网络,通过融合卫星、无人机通信网络等非地面通信网络,可以实现天、空、地一体化通信网络^[43,44],这为基于虚拟车道技术的空地一体化交通提供了覆盖全域的空中接口. 亚厘米级的定位精度以及毫秒级的时间同步^[45,46]能够为面向自动驾驶的高精度地图提供更快的刷新率,从而保障城市级别数字孪生系统的实时性和虚拟车道感知和决策的快速响应. 此外,智能反射面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)被认为是未来 6G 生态系统的一种有前途的技术^[47]. IRS 可用于实现 6G 无线通信系统的智能和可重构无线传播环境,为从根本上解决无线信道衰落损害和干扰问题提供了新的手段^[48]. 并且 IRS 具有成本低、无天线噪声放大和自干扰、易于集成到无线网络等优势,因此通过 IRS 在高层建筑表面的密集部署,可以有效地扩展空地一体化交通的网络容量以及无线通信系统的覆盖范围,还可以化解城市峡谷地形导致的卫星信号屏蔽影响车辆精确定位的问题.

3.3.5 可行性分析

空地一体化交通的实现需要交通、通信、自动化等多领域的先进技术相互支撑. 该场景下,城市路网跨入空域,多层次的交通流需要合理规范的交通管理技术支持;自动驾驶汽车从地面过渡到天空,在城市间三维方向上的驾驶安全需要精确的空间定位和导航技术来保障;移动通信和车路协同为满足 FCTS 的用户需求,需要将通信和感知的覆盖范围扩展至空域,海量数据的接入需要对有限地通信资源进行合理地分配. 因此,作为面向空地一体化交通场景的 L6 自动驾驶技术,高级虚拟车道需要交通、通信以及自动化三方面技术手段的共同驱动和相互配合.

在本文中,高级虚拟车道采用了基于 sky-lanes 的空域交通管理模型,文献[37]已对其给出了详细的系统设计准则和数值仿真模拟,该空域交通结构能够保

障城市空域交通系统下的高吞吐系统性能以及车辆间纵向分离安全,可用于规范空中无人机在高度自治下的运动,以及预测未来交通系统的特点^[37]. 其次,本文对于定位和导航所使用的 SLAM 技术可扩展到高维数据空间,融合激光雷达和摄像机等传感器的三维 SLAM 技术^[49,50]通过与空地高精度地图中的城市地面及建筑纹理、层级部署 IoT 信标位置和虚拟车道等信息进行匹配,可实现精确的空间定位和三维导航. 对于空地一体交通的海量接入用户和多源异构感知信息,就目前通信技术的最新发展可知,融合 6G 的通信-感知-计算方案^[51]在高维数据处理和高维资源管理问题上有效且可行的.

4 未来挑战

相比于 L1-L5 自动驾驶,L6 空地全域自动驾驶由于应用场景的特殊性和复杂性,其在未来的大规模商用方面仍然存在巨大的挑战,更多的自身及环境因素需要被考虑,如气候、能耗、协同调度、网络安全等.

(1) 气候影响:飞行汽车行驶在城市空域不同高度上的虚拟路网中,会对不利天气条件(如暴风雨)十分敏感,因此,FCTS 专用的天气预报系统需要在空地一体化交通系统设计中考虑. 该系统能够通过云端把不利天气预报给相应空域中的车端,然后在整个虚拟路网层面对影响的飞行汽车重新规划虚拟车道,制定自适应的控制方案.

(2) 能耗问题:飞行汽车驾驶中的起飞和爬升过程使其面临更高的能耗和排放. 在给定的燃料/电量下,飞行汽车在空中的最大飞行距离和最大飞行时间决定了其用于大规模生产和商用的价值. 为此,飞行汽车的设计和在生产环节中需要综合考虑车辆重量、起降模式、发动机功耗和推力以及天气影响等各种因素.

(3) 协同调度:随着飞行汽车的投入运营,FCTS 将面临高峰时段的拥堵压力,且不同类型飞行器(如无人机、直升机等)可能与飞行汽车共用城市空域,为了避免城市空域中的任何碰撞发生,准确的监控和指挥是必不可少的. 空地一体化交通系统应建立地面辅助监控网络来进行实时监控和管理,以提供及时的交通控制和协同调度服务.

(4) 网络安全:由于 L6 自动驾驶场景的通信网络规模扩展至空域,大量的连接将导致全域控制网络很容易受到入侵和攻击,有害的网络病毒或欺诈数据会干扰网络的正常运行,如窃取私人信息,强行夺取目标车辆控制权,或伪装成普通车辆或服务器潜入网络获取利益等^[52]. 区块链技术将是空地一体化交通场景下保障安全可靠通信的有效方案,其分布式的数据存储方式可以化解网络集中化管理易受单点攻击所导致的

数据篡改和隐私泄露问题^[53,54].

5 总结

空地一体化交通将是下一代科技浪潮的重要应用场景,L6空地全域自动化是未来自动驾驶行业发展的必然趋势.虚拟车道技术作为L6的关键使能技术,通过对城市空间的全方位感知和通信,可为自动驾驶飞行汽车提供空地高精度地图用于空间定位和三维虚拟通道导航,从而构建城市空域虚拟路网为空地一体化交通场景下的L6自动驾驶提供高效可行的方案.然而,虚拟车道技术并非一蹴而就,将伴随自动驾驶等级的提升而演进.本文旨在帮助自动驾驶行业明晰未来总体的发展方向,希望在学术界和工业界的共同努力下,这项虚拟车道技术能够早日实现并为人类科技进步做出划时代的贡献.

参考文献

- [1] LU Q, TETTAMANTI T, HÖRCHER D, et al. The impact of autonomous vehicles on urban traffic network capacity: An experimental analysis by microscopic traffic simulation [J]. *Transportation Letters*, 2020, 12(8): 540-549.
- [2] MOODY J, BAILEY N, ZHAO J. Public perceptions of autonomous vehicle safety: An international comparison [J]. *Safety Science*, 2020, 121(1): 634-650.
- [3] NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION. Automated Driving Systems 2.0: A Vision for Safety[R]. Washington, DC: US Department of Transportation, DOT HS, 2017: 442.
- [4] FAISAL A, KAMRUZZAMAN M, YIGITCANLAR T, et al. Understanding autonomous vehicles[J]. *Journal of Transport and Land Use*, 2019, 12(1): 45-72.
- [5] Society of Automotive Engineers. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles: J3016[S]. USA: SAE, 2016: 9.
- [6] YAQOUB I, KHAN L U, KAZMI S M A, et al. Autonomous driving cars in smart cities: Recent advances, requirements, and challenges[J]. *IEEE Network*, 2019, 34(1): 174-181.
- [7] OKUDA R, KAJIWARA Y, TERASHIMA K. A survey of technical trend of ADAS and autonomous driving[C]//HO E. *Technical Papers of 2014 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test*. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 1-4.
- [8] ZIEBINSKI A, CUPEK R, GRZECHCA D, et al. Review of advanced driver assistance systems(ADAS)[C]//VANCE A. *AIP Conference Proceedings*. NY, USA: AIP Publishing LLC, 2017: 120002.
- [9] YOUSRI R, ELATTAR M A, DARWEESH M S. A deep learning-based benchmarking framework for lane segmentation in the complex and dynamic road scenes[J]. *IEEE Access*, 2021, 9(1): 117565-117580.
- [10] TABELINI L, BERRIEL R, PAIXAO T M, et al. Keep your eyes on the lane: Real-time attention-guided lane detection[C]//BROWN M S. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Piscataway, USA: IEEE, 2021: 294-302.
- [11] LIU R, WANG J, ZHANG B. High definition map for automated driving: Overview and analysis[J]. *The Journal of Navigation*, 2020, 73(2): 324-341.
- [12] YANG Z, HUA Y, ZI L, et al. Analysis of the development status and key technologies of high-precision map [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021, (6): 54-60.
- [13] 高俊. 图到用时方恨少,重绘河山待后生——《测绘学报》60周年纪念与前瞻[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1219-1225.
GAO Jun. The 60 anniversary and prospect of acta geodaetica et cartographica sinica[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1219-1225. (in Chinese)
- [14] Uber Technologies Inc. The future of urban mobility[EB/OL]. (2020-12-08) [2022-03-15]. <https://www.uber.com/us/en/elevate>.
- [15] RAIASHEKARA K, WANG Q, MATSUSE K. Flying cars: Challenges and propulsion strategies[J]. *IEEE Electrification Magazine*, 2016, 4(1): 46-57.
- [16] PAN G, ALOUINI M S. Flying car transportation system: Advances, techniques, and challenges[J]. *IEEE Access*, 2021, 9(1): 24586-24603.
- [17] AHMED S S, HULME K F, FOUNTAS G, et al. The flying car—challenges and strategies toward future adoption [J]. *Frontiers in Built Environment*, 2020, 6(1): 106.
- [18] MOFOLASAYO A. Potential policy issues with flying car technology[J]. *Transportation Research Procedia*, 2020, 48(1): 8-22.
- [19] POSTORINO M N, SARNÉ G M L. Reinventing mobility paradigms: Flying car scenarios and challenges for urban mobility[J]. *Sustainability*, 2020, 12(9): 3581.
- [20] MAO G, HUI Y, REN X, et al. The internet of things for smart roads: A road map from present to future road infrastructure[J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2021, 1(1): 2-12.
- [21] 吴大鹏, 张普宁, 王汝言. "端一边一云"协同的智慧物联

- 网[J]. 物联网学报, 2018, 2(3): 21-28.
- [22] CHEN Z, LIU Z, HUI Y, et al. Roadside sensor based vehicle counting in complex traffic environment[C]//ZUCKERMAN D. 2019 IEEE Globecom Workshops(GC Wkshps). Piscataway, USA: IEEE, 2019: 1-5.
- [23] FENG Y, MAO G, CHENG B, et al. MagMonitor: Vehicle speed estimation and vehicle classification through a magnetic sensor[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 23(2): 1311-1322.
- [24] FENG Y, MAO G, CHENG B, et al. MagSpeed: A novel method of vehicle speed estimation through a single magnetic sensor[C]//GU Y. 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference(ITSC). Piscataway, USA: IEEE, 2019: 4281-4286.
- [25] KLEIN L, MIHAYLOVA L, FAOUZI N E EL. Sensor and data fusion: Taxonomy, challenges and applications [M]//Chapman & Hall. Handbook on Soft Computing for Video Surveillance. London, UK: Chapman & Hall, 2012: 139-183.
- [26] DING W, JING X, YAN Z, et al. A survey on data fusion in internet of things: Towards secure and privacy-preserving fusion[J]. Information Fusion, 2019, 51(1): 129-144.
- [27] BADER K, LUSSIER B, SCHÖN W. A fault tolerant architecture for data fusion: A real application of Kalman filters for mobile robot localization[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2017, 88(1): 11-23.
- [28] CASTANEDO F. A review of data fusion techniques[J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013(1): 704504.
- [29] HE S, SHIN H S, TSOUDOS A. Distributed joint probabilistic data association filter with hybrid fusion strategy [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(1): 286-300.
- [30] LIU J, XIAO J, CAO H J, et al. The status and challenges of high precision map for automated driving[C]//SUN J. China Satellite Navigation Conference. Singapore: Springer, 2019: 266-276.
- [31] BRESSON G, ALSAYED Z, YU L, et al. Simultaneous localization and mapping: A survey of current trends in autonomous driving[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2017, 2(3): 194-220.
- [32] 于娟, 杨琼, 鲁剑锋, 韩建民, 彭浩. 高级地图匹配算法: 研究现状和趋势[J]. 电子学报, 2021, 49(9): 1818-1829. YU Juan, YANG Qiong, LU Jian-feng, HAN Jian-min, PENG Hao. Advanced map matching algorithms: A survey and trends[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(9): 1818-1829. (in Chinese)
- [33] CHIANG K W, TSAI G J, CHU H J, et al. Performance enhancement of INS/GNSS/Refreshed-SLAM integration for acceptable lane-level navigation accuracy[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(3): 2463-2476.
- [34] SONG Q, ZHAO Q, WANG S, et al. Dynamic path planning for unmanned vehicles based on fuzzy logic and improved ant colony optimization[J]. IEEE Access, 2020, 8(1): 62107-62115.
- [35] PanoSim Technologies Ltd. 汽车智能驾驶一体化仿真测试平台 PANOSIM 5.0[EB/OL]. [2022-03-15] <http://www.panosim.com>.
- [36] GUSTAFSSON F. Particle filter theory and practice with positioning applications[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2010, 25(7): 53-82.
- [37] JANG D S, IPPOLITO C A, SANKARARAMAN S, et al. Concepts of airspace structures and system analysis for uas traffic flows for urban areas[C]//Curran Associates, Inc. AIAA Information Systems-AIAA Infotech@Aerospace. Reston, USA: AIAA, 2017: 449.
- [38] FULLER A, FAN Z, DAY C, et al. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research[J]. IEEE Access, 2020, 8(1): 108952-108971.
- [39] 庞京, 魏泽华, 武迎兵. 静止轨道卫星通信系统常见干扰信号类型及定位方法分析[J]. 数字通信世界, 2016, 2016(10): 56-60.
- [40] CHEN S, HU J, SHI Y, et al. A vision of C-V2X: technologies, field testing, and challenges with Chinese development[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(5): 3872-3881.
- [41] 廖勇, 田肖懿, 蔡志镛, 花远肖, 韩庆文. 面向 C-V2I 的基于边缘计算的智能信道估计[J]. 电子学报, 2021, 49(5): 833-842. LIAO Yong, TIAN Xiao-yi, CAI Zhi-rong, HUA Yuan-xiao, HAN Qing-wen. Intelligent channel estimation based on edge computing for C-V2I[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(5): 833-842. (in Chinese)
- [42] JIA D, NGODUY D. Enhanced cooperative car-following traffic model with the combination of V2V and V2I communication[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 90(1): 172-191.
- [43] 孙韶辉, 戴翠琴, 徐晖, 康绍莉, 缪德山. 面向 6G 的星地融合一体化组网研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 891-901.
- [44] 吴晓文, 焦侦丰, 凌翔, 刘冰, 朱立东, 韩磊. 面向 6G 的卫星通信网络架构展望[J]. 电信科学, 2021, 37(7): 1-14.

- [45] YOU X, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. Science China Information Sciences, 2021, 64(1): 1-74.
- [46] 李元杰, 董超, 牛凯. 面向 6G 的高分辨率无线信道频域仿真方法及定位技术研究[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(1): 13-20.
- [47] RAJATHEVA N. White paper on broadband connectivity in 6G[EB/OL]. (2020-04-29)[2022-03-15]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.14247>.
- [48] WU Q, ZHANG S, ZHENG B, et al. Intelligent reflecting surface aided wireless communications: A tutorial[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(5): 3313-3351.
- [49] 贾松敏, 王可, 郭兵, 李秀智. 基于 RGB-D 相机的移动机器人三维 SLAM[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 103-109.
- [50] TOMONO M. Loop detection for 3D LiDAR SLAM using segment-group matching[J]. Advanced Robotics, 2020, 34(23): 1530-1544.
- [51] 闫实, 彭木根, 王文博. 通信-感知-计算融合: 6G 愿景与关键技术[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(4): 1-11.
- [52] XIA L, SUN Y, SWASH R, et al. Smart and secure CAV networks empowered by AI-enabled blockchain: The next frontier for intelligent safe-driving assessment[J]. IEEE Network, 2022, 36(1): 197-204.
- [53] GUPTA R, TANWAR S, KUMAR N, et al. Blockchain-based security attack resilience schemes for autonomous vehicles in industry 4.0: A systematic review[J]. Computers & Electrical Engineering, 2020, 86(1): 106717.
- [54] 陈露, 相峰, 孙知信. 基于属性密码体制的区块链安全技术研究进展[J]. 电子学报, 2021, 49(1): 192-200.
CHEN Lu, XIANG Feng, SUN Zhi-xin. A survey of blockchain security technologies based on attribute-based cryptography[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(1): 192-200. (in Chinese)



王 硕 男, 1998 年出生于天津. 现为西安电子科技大学在读硕士生. 主要研究方向为智能交通系统、大数据.

E-mail: swang123@stu.xidian.edu.cn



岳文伟 男, 1992 年出生于山西太原. 现为西安电子科技大学通信工程学院讲师. 主要研究方向为智能交通系统、无线传感器网络、大数据.

E-mail: wwyue@xidian.edu.cn



毛国强 男, 现为西安电子科技大学智慧交通研究院院长、教授、博士生导师. 主要研究方向为智能交通系统、物联网、应用图论、无线传感器网络、无线定位技术.

E-mail: gqmao@xidian.edu.cn



何祥健 男, 现为悉尼科技大学电子与数据工程学院教授. 主要研究方向为人工智能与图像处理、分布式计算.

E-mail: Xiangjian.He@gmail.com

作者简介



李长乐 男, 现为西安电子科技大学通信工程学院副院长、教授、博士生导师. 主要研究方向为智能交通系统、车联网、移动自组织网络、无线传感器网络.

E-mail: clli@mail.xidian.edu.cn