

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.08.001

面向车-路-图协同的分布式自动驾驶仿真平台 架构及应用*

张佳楠¹, 胡钊政^{1,2}, 孟杰^{1,2}, 胡华桦¹, 左洁¹

(1. 武汉理工大学智能交通系统研究中心, 武汉 430000; 2. 武汉理工大学重庆研究院, 重庆 401120)

[摘要] 为解决车路图协同仿真环境下的单机式测试平台效率低下、系统可扩展性不足的问题, 本文提出了一种面向车-路-图协同的分布式自动驾驶仿真平台架构, 并将该平台命名为 VIMS (vehicle-infrastructure-map system)。VIMS 平台以 CARLA 作为虚拟仿真引擎, 通过引入真实高精地图, 接入驾驶模拟器、信号机等硬件在环设备, 形成了虚实结合的交通场景; 考虑功能的交互作用, VIMS 平台分为主世界、智能车、智能路侧和高精地图 4 个模块, 采用 ROS 分布式架构实现模块内部的相对独立和模块间的互联互通; 考虑到平台的计算可靠性与可用性, 采用分布式计算实现 4 个模块间的独立计算。通过车道保持和车路图协同定位算法为例进行应用验证, 通过平台实现了数据采集、传输和算法的验证测试与评价, 结果表明, 本文所提出的平台可以实现车、路、图协作的实时仿真, 保证模块的有机运行, 系统架构可扩展性高。

关键词: 车路协同; 高精地图; 虚实结合仿真; 自动驾驶

Distributed Simulation Platform Architecture and Application of Autonomous Driving for Vehicle-Road-Map Collaboration

Zhang Jianan¹, Hu Zhaozheng^{1,2}, Meng Jie^{1,2}, Hu Huahua¹ & Zuo Jie¹

1. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430000;

2. Chongqing Research Institute of Wuhan University of Technology, Chongqing 401120

[Abstract] In order to solve the problems of low efficiency and insufficient system scalability of single-machine test platforms in the vehicle-road-map collaborative simulation environment, a distributed autonomous driving simulation platform architecture for vehicle-road-map cooperative simulation is proposed in this paper, named VIMS (Vehicle-Infrastructure-Map System). The VIMS platform uses CARLA as the virtual simulation engine. By introducing in real high-definition maps and connecting the hardware-in-the-loop devices such as driving simulators and signal machines to VIMS, the virtual-real traffic scene is formed. Considering the interaction of functions, the VIMS platform is divided into four modules, namely, the main world, the intelligent vehicle, the intelligent roadside, and the high-definition map, adopting ROS distributed architecture to realize the relative independence of the modules and interconnection between the modules. Considering the computational reliability and availability of the platform, distributed computing is used to realize independent computation among the four modules. Through the lane-keeping and vehicle-road-map collaborative positioning algorithm as examples for application validation, data acquisition, transmission and algorithm validation tests and evaluation are realized through the platform. The results show that the platform proposed in this paper can realize the real-time simulation of vehicle, road, and map collaboration to ensure that the modules operate organically and that the system architecture is highly scalable.

* 国家重点研发计划项目(2022YFB2502904)、湖北省重点研发计划项目(2022BAA082)和重庆市科技创新重大研发项目(CSTB2022TIAD-STX0003)资助。

原稿收到日期为 2024 年 01 月 23 日, 修改稿收到日期为 2024 年 04 月 14 日。

通信作者: 胡钊政, 教授, 博士, E-mail: zzh@whut.edu.cn。

Keywords: collaborative vehicle infrastructure system; high-definition map; real - virtual simulation; autonomous driving

前言

车路协同系统采用先进的无线通信和人工智能、大数据、云计算等技术,通过全时空动态交通信息采集与融合,通过车车、车路等实现信息交互和共享,充分实现人、车、路的有效协同,保证交通安全,提高通行效率^[1]。与单车智能感知相比,车路协同能够突破局部感知范围有限、遮挡而导致的感知可靠性不足,打破交通参与者感知孤岛,从根本上提升感知能力。因此,车路协同感知被认为是重要的发展方向。

虽然早前一些工作致力于车路协同研究,然而由于缺乏大型的公开数据集,该技术的推进缓慢^[2]。

由于目前的V2X通信技术不成熟,同时进行多车辆数据和路侧数据采集的成本较高,构建真实数据集十分困难。国内DAIR-V2X数据集^[3]是全球首个来自真实场景的车与路(vehicle-to-infrastructure, V2I)协同感知数据集,该数据集仅包含一台智能车和一个智能路侧的多模态传感器数据,忽略了多智能车场景。V2V4Real数据集^[4]是第

一个用于车与车(vehicle-to-vehicle, V2V)协同感知的真实场景多模态数据集,由2辆搭载激光雷达和摄像头的车辆收集数据,未进行智能路侧数据的收集。仿真由于成本低、效率高等优势在自动驾驶中扮演至关重要的角色,目前已有研究团队开发了虚拟车路协同仿真数据集。V2V-SIM数据集^[5]通过使用高保真的激光雷达模拟器LiDARsim来模拟交通场景中车辆的点云信息,不包含图像信息,也不支持V2I协同感知;OPV2V数据集^[6]通过协同模拟框架OpenCDA和CARLA模拟器^[7]进行V2V场景的收集,包含激光雷达数据和图像数据;V2X-Sim数据集^[8]通过SUMO^[9]和CARLA模拟器生成V2V、V2I场景下的多模态感知数据。表1总结了目前支持V2X协同感知的数据集。然而,众所周知,仿真数据和现实数据之间存在明显的差距,因为传感器模型、交通场景的渲染不够真实,交通参与者行为模型的建模不够精确^[10]。完全基于虚拟仿真数据训练的模型可能无法很好地泛化到真实驾驶情境,一般通过将真实世界的元素,如控制器、传感器等硬件^[11]、整车^[12]等引入到仿真环境中来打破虚拟仿真的局限性,提升仿真的拟真度。

表1 支持V2X协作感知的数据集

数据集	来源	应用场景	传感器组成			高精地图
			相机	激光雷达	IMU/GPS	
DAIR-V2X	真实场景	V2I	√	√	√	×
V2V4Real	真实场景	V2V	未开源	√	√	未开源
V2V-SIM	LiDARsim	V2V	×	√	×	√
OPV2V	OpenCDA和CARLA模拟器	V2V	√	√	√	√(虚拟)
V2X-Sim	SUMO和CARLA模拟器	V2I和V2V	√	√	√	√(虚拟)

近年来,高精地图在感知任务中受到了极大的关注。作为未来出行的关键一环,高精地图被认为是交通资源全时空实时感知的载体,有效地支撑车路协同一体化^[13]。高精地图能够提供强大的先验信息,包含地理、几何和语义等先验^[14],弥补感知盲区,实现协同高精度定位。将高精地图数据引入车路协同系统中,不仅能够提供更准确的道路结构和特征,提供多样化的场景和路况,比如城市道路、高速公路等不同类型的道路,还能够为多种来源、多种视角的传感器提供统一的时空标准。以高精地图坐标系作为车路协同的统一坐标系既符合驾驶人的驾驶习

惯,方便驾驶人直观了解驾驶环境信息,又可以为交通管理部门提供全局性视角,有效地分析交通运行状况。

针对车路协同自动驾驶的仿真软件通常是在自动驾驶仿真软件的基础上进行开发的,该类软件具备环境感知-规划决策-运动执行一体化的模拟能力,典型代表有以百度Apollo、腾讯TAD Sim、微软AirSim、英特尔CARLA、LG公司的LGSVL等。自动驾驶仿真软件通常与VISSIM、SUMO、Flow等交通流仿真软件构成联合仿真平台。车路图协同仿真平台的计算量大,不仅承担了多源异构传感器数据的生

成工作,还须支持智能车、智能路侧和高精地图的算法。但目前的仿真平台多为单机计算模式,受限于单台计算机的计算资源和扩展性限制,在处理面向车路协同场景下的仿真测试任务时,单机计算无法提供足够的计算资源,通常也很难实现水平扩展。不仅如此,当前仿真测试平台应用过于单一^[15],面向对象多集中于智能车,忽略了智能路侧、高精地图等局部和全局视角下的仿真测试内容,缺乏面向车、路、图协同机制的仿真平台。

因此,开发了基于CARLA模拟器和ROS分布式架构的虚实结合车-路-图协同系统仿真平台,本文将上述平台命名为VIMS(vehicle-infrastructure-map system)平台,该平台采用松散耦合的架构将车、路、图等信息链接起来,提供实时交通信息的采集和共享,能够实现复杂交通环境下的算法测试;为了弥补仿真与现实的鸿沟,通过引入真实世界的高精地图来提升仿真测试场景的可靠性,通过引入驾驶模拟器、整车、信号机等硬件在环设备来进一步支撑算法测试有效性;同时为了满足大规模、高拟真度的交通仿真场景和在线离线数据快速处理的要求,本平台采用分布式计算架构,为车端、路侧、高精地图提供了算力支持,各模块可独立完成计算和可视化等任务。通过“即插即用”的车路图多源数据交互框架和交互协议,实现不同等级的车路协同自动驾驶仿真测试,满足了不同测试对象、测试任务和测试条件的要求。

本文主要贡献可以总结为以下3个方面。

(1)提出了一种面向V2X场景的虚实结合仿真平台VIMS,该平台将CARLA模拟器作为仿真引擎,通过引入真实道路的高精地图进行交通场景的构建,通过接入驾驶模拟器和信号机等硬件设备更好地模拟真实驾驶环境中的各种道路条件和交通规则,生成更加真实的支持V2X场景的数据。

(2)构建的VIMS平台具有高可扩展性,利用并行通信和分布式计算来提升系统的效率和可靠性。利用ROS通信机制实现了不同模块之间、软硬件之间的交互,实现了主世界、智能车、智能路侧、高精地图4个模块之间的有机结合。利用分布式计算架构,为车端、路侧、高精地图提供了算力支持,实现不同模块的单独计算,提高了平台的可靠性和可用性。

(3)利用VIMS平台,快速生成不同等级车辆的算法所需要的场景和不同任务所需要的数据,通过平台多模块、软硬件之间合作进行了传感器数据的

采集、传输和算法的测试,验证了平台系统架构在应对车路图协同仿真测试的有效性。

1 VIMS平台架构

网联化与智能化是车路协同系统的典型特征,作为多智能体协作系统,车-路-图协作平台在设计时,须考虑模块化和可扩展性。智能车、智能路侧和高精地图功能上既互相独立又互相支持,三者均可进行独立的计算、测试和评估,实现高效的协作开发,同时,互相之间通过数据接口传递消息实现协作。因此在平台构建时须考虑到将部分感知、计算和服务等功能进行分布式部署,探索实现车辆、路侧设施和云端的深度融合。

在选择生成车路图协同场景的仿真软件时考虑到效率、拟真度、支持多种在环测试等多方要求,通过对多种仿真测试工具进行对比分析,选择了CARLA模拟器。CARLA模拟器是由西班牙巴塞罗那自治大学计算机视觉中心指导开发的开源仿真模拟器,支持激光雷达、RGB相机、深度相机、语义相机、GNSS等多类传感器模型仿真,支持自动驾驶系统的开发、训练和验证,可扩展性高。在实现车、路、图等不同模块之间的通信时,考虑到通用性和系统的架构,选择采用ROS通信协议。ROS是一个优秀的机器人分布式框架,功能模块以节点为单位独立运行,可以分布于多个相同或者不同的主机中,其分布式通信机制提供多节点之间的通信服务。基于TCP/UDP网络封装的TCPROS/UDPROS通信系统和Nodelet通信方法为多进程通信提供一种优化的数据传输方式。ROS框架支持建立多服务器分布式计算环境,允许应用跨服务器通信并有机地组成一个系统整体。由于VIMS平台设计了分布在不同服务器的软件模块,因此主服务器(Master)是ROS中特殊的服务器,其负责应用的注册、执行并运行参数服务器和信息记录服务。从服务器(Slave Server)通过局域网与Master建立连接。在VIMS平台中,将CARLA仿真模拟器作为平台的Master,作为交通场景的引擎,生成场景数据、交通流数据和传感器数据,Slave Server分别为智能车、智能路侧和高精地图,通过与Master交互获得需要的数据,并在自我服务器上进一步的处理。

按照上述架构思路,本文所提出的VIMS平台按照ROS通信架构,将系统分成仿真平台和硬件设

备,其中仿真平台分为①主世界、②高精地图、③智能路侧、④智能车4个模块,通过有线/5G/WiFi连接,实现数据交互,可完成自动驾驶、车路协同相关

的算法、功能与系统测试,信号灯、驾驶模拟器、整车等在环设备通过与不同模块的链接实现VIMS平台的嵌入,系统架构如图1所示。

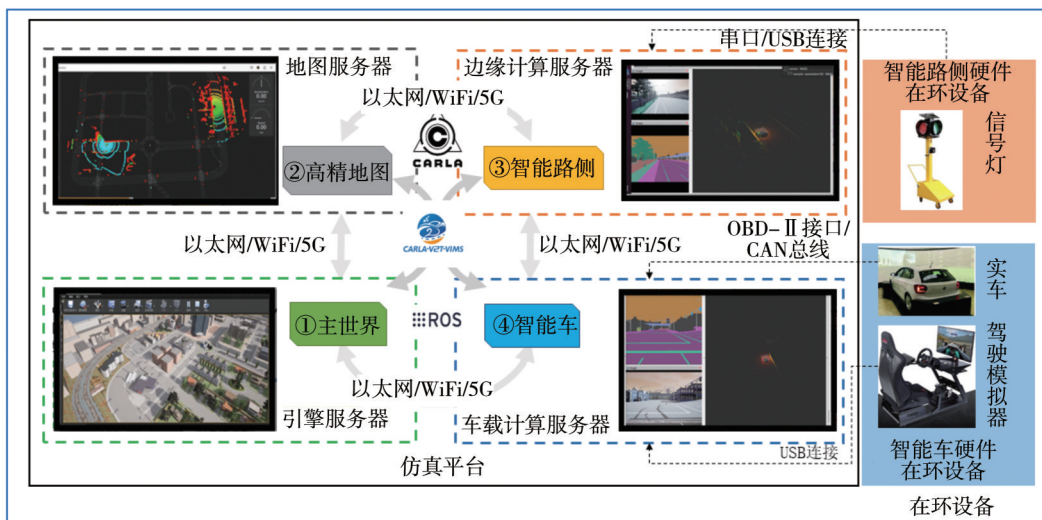


图1 VIMS平台组成

VIMS平台的功能包括交通场景生成、传感器数据采集、信息交互、可视化、测试评价等,每个模块均包含计算单元、通信单元和显示单元,计算单元负责模型渲染、功能计算等,可视化单元将模块的实时状态、算法模型结果等高效准确地表达出来,二者之间通过HDMI线连接,保证高质量的信号传送。模块①②③④通过V2X/5G/WiFi连接至同一局域网中,

将主世界模块作为Master进行ROS通信配置,其他模块作为从机进行文件配置,使得各个模块之间可以灵活地通信和交互,可以实现与车辆、路侧设施和云端服务器等之间的数据交换,平台的通信架构如图2所示。平台的硬件设备与软件模块之间设计了“即插即用”的交互协议和多种接口,方便开发者进行算法的测试和优化。

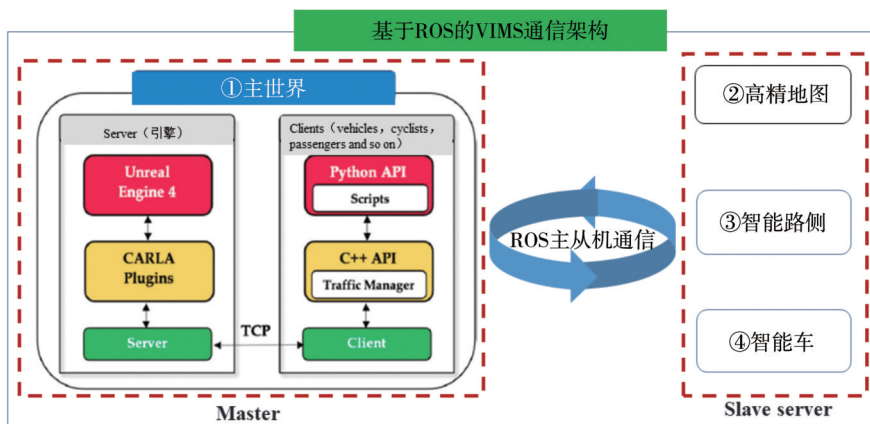


图2 VIMS平台通信架构与数据交换机制

2 VIMS平台系统构建

虚实交互测试技术通过将自动驾驶系统中的部分/全部实际测试对象融入虚拟测试环境,实现可

调试、低成本、多场景的综合性测试,VIMS平台通过松散耦合的架构和规范、标准的数据交互协议,轻松地添加新的硬件设备或软件应用模块,并且这些新组件无须进行复杂的配置或修改,便可立即在平台中使用,支持信号机在环、驾驶模拟器在环、整车在

环等多种硬件设备接入仿真系统,实现“即插即用”。

平台软件组成的模块定义及功能如下。

2.1 主世界

主世界是VIMS平台的核心,作为交通场景引擎,在进行车路图协同仿真时,需要首先在主世界中设置地图的加载,车端、路侧传感器的安装。主世界负责模拟和生成各种道路场景,提供丰富的路况、天气和交通流量变化,生成传感器多视角、异构的传感器数据,它还管理着整个仿真过程中的时间和事件,确保各个计算单元的同步和协调。主世界的运行场景如图3所示。



图3 主世界模块运行

主世界采用 Client-Server 架构,Server 端由 Unreal Engine 和 Carla 共同组成,负责和仿真相关的功能,包括传感器渲染、物理计算、更新世界状态等。Client 端支持多个 Client 同时运行负责控制 actor 的逻辑,设置世界的光照、晴雨等状态。

2.2 高精地图

高精地图是车路协同自动驾驶的基础设施。它与主世界紧密合作,确保仿真环境的准确性和真实性。高精地图模块提供了高精度的地图数据,包括路网、车道、交通标志等静态信息和交通信号等半动态信息。高精地图模块还负责将智能车、智能路侧、车路协同等的感知数据精确映射至刚性、静态的地图数据上,通过实时更新感知数据,实现高精地图车辆、行人等高动态信息的更新。

高精地图为车辆的感知和规划提供了重要的基础数据,存储在高精地图中的拓扑信息、语义信息及几何信息能够为车辆提供超视距信息,帮助车辆进行感知,并赋能实现车道级路径规划和精细化决策。高精地图模块的运行如图4所示。

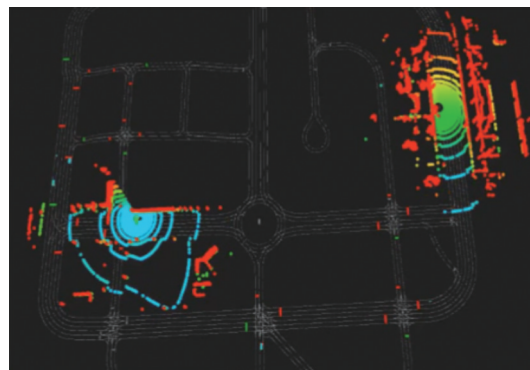


图4 高精地图模块运行

在VIMS平台中,引入了真实场景的高精地图来提升交通场景的真实性。支持VIMS平台的高精地图的静态图层制作过程如图5所示。首先,通过装备有激光雷达、相机、GPS、惯性测量单元等传感器的车辆或机器人进行静态图层地图数据的采集;其次,对收集的数据进行去噪、配准和过滤,利用离线SLAM(simultaneous localization and mapping)建图技术如 LeGO-LOAM^[16]、LIO-SAM^[17]等来构建高精度的三维点云地图;接下来,进行静态图层的制作。将三维点云地图导入制图软件中进行地图标注加工,标注出路网、车道、交通标志及其几何和拓扑信息,以及交通标志、路侧设施的几何和规则信息等其他重要的地理要素,得到道路的结构化信息;最后,将静态地图数据导入CARLA中,通过CARLA的编辑工具对地图进行进一步的验证,以确保静态图层地图数据的正确性和完整性。使用Unreal Engine引擎,通过将建筑物,树木、草丛等植物,街灯、长椅等装饰物三维模型加入到交通场景。

2.3 智能路侧

智能路侧模块通过摄像头、激光雷达等传感器获取道路信息,通过网络将数据汇聚到边缘计算单元进行数据融合和分析,计算出感知范围内交通参与者的信息,再将信息按照约定的通信和交互标准传递给智能车和高精地图。VIMS平台支持多个智能路侧协同工作,通过集成各自的感知能力,实现大视场的感知,从而覆盖更广阔的区域,实现周围车辆、行车灯交通状态信息的精细化感知,图6展示了2个安装激光雷达的路侧合作感知。

智能路侧模块能够提供道路环境的实时信息,通过对感知到的道路环境进行分析和处理,智能路侧模块可以及时向驾驶员和相关监管部门提供预警信息,有效避免交通事故的发生。同时,它还可以应

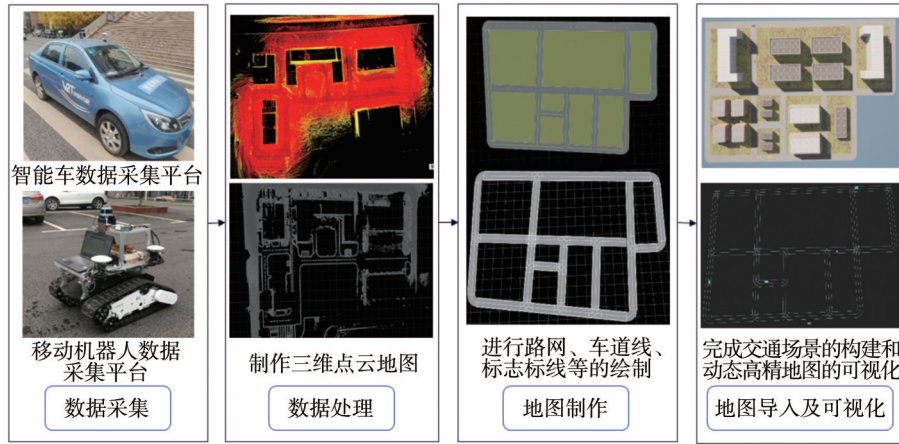


图5 高精地图静态图层制作流程

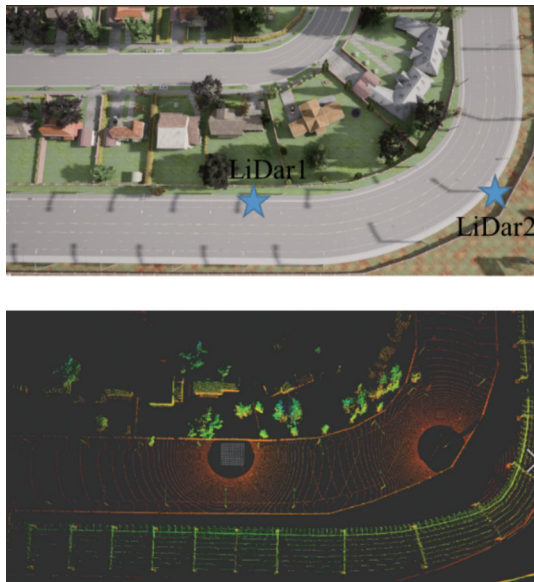


图6 多路侧、大视场的智能路侧感知

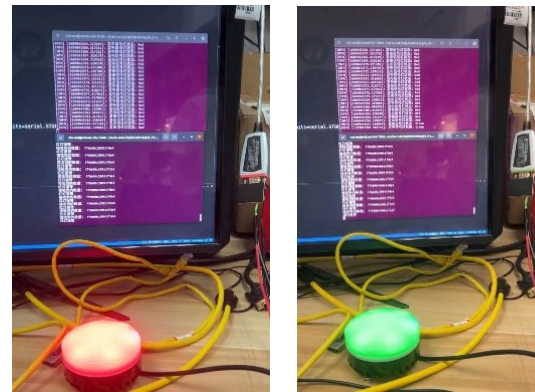


图7 信号灯在环效果

用先进的算法对交通数据进行分析,实现车流量统计、车辆违停检测、区间测速等功能,为交通管理决策提供可靠的数据支持。

本平台在智能路侧设计了信号机在环,在仿真平台中添加信号机模型,信号机模型能够根据信号配时等特定的策略和规则实现信号灯不同状态的转换,主世界同步接收执行信号机输出的灯态信息来控制仿真车流发生加减速、停车等变化。智能路侧平台接收到信号配时相关消息后实现与实际物理信号灯的通信,如图7所示。将实际的物理信号灯与仿真平台服务器建立稳定的连接,可帮助更加真实地模拟道路交通情景,从而更全面地测试和验证自动驾驶算法的可行性和稳定性。

2.4 智能车

智能车模块提供了丰富的车辆类型,包括大中小型乘用车、客车和货车等商用车,还可以按需生成机场引导车等特种车型,如图8所示。这些车辆类型的覆盖范围广泛,可以适应不同场景下的交通运行的需求,满足不同仿真测试任务中对于特定测试对象的要求。

在SAE对车辆驾驶性能的评价中,L2-L3级别的智能驾驶车辆通常涉及驾驶员与智能控制系统之间驾驶权切换的过程,车辆驾驶模式正处于从人工驾驶、辅助驾驶直至高级无人驾驶的发展历程中。因此在仿真测试中,须注入包括异质化的驾驶行为等合理的信息,本平台的智能车模块提供了两种不同的控制模式,当车辆处于自动驾驶模式时,既可以按照规划路线进行自动行驶,又可以根据主世界运行规则自动行驶;当车辆处于手动驾驶模式时,可通过驾驶模拟器(如图9所示)实现人工接管自动驾驶



(a) 常见的车辆类型



(b) 按需定制的机场引导车

图8 智能车类型

车辆。根据SAE J3016标准的定义,L0-L3级的自动驾驶系统都要求人类驾驶员在必要时接管驾驶控制。L4级自动驾驶,在超出设计运行区域(operational design domain, ODD)时,人类驾驶员也需要接管驾驶控制^[18]。本平台遵循这个原则,处于自动驾驶模式的车辆在进行驾驶权切换时,对于L0-L3级的自动驾驶车辆,驾驶员可以随时切换至手动驾驶模式,对于L4级自动驾驶车辆,只有当系统发出接管请求时,驾驶员才能接管车辆进入手动驾驶模式。对于L5级自动驾驶车辆,驾驶员无权接管车辆,车辆只能处于自动驾驶模式。因此,智能车模块可以实现更灵活多变的驾驶行为,同时可在自动驾驶和手动控制之间一键切换,支持不同等级的自动驾驶车辆仿真。

智能车模块是仿真平台中的自动驾驶算法和控制系统。它通过感知传感器获取周围环境信息,并与主世界和智能路侧模块进行通信。智能车模块根据感知数据进行目标检测、障碍物避让、路径规划和控制,以实现自动驾驶功能。同时,它也会将自身状态和行为信息反馈给其他计算单元,以保持整个系统的协调性和一致性。



图9 G29控制器及组成

3 VIMS平台应用及测试验证

为验证VIMS平台支持车-路-图协同、实时仿真等特性,本文选取了面向L2级自动驾驶车辆经典控制算法车道保持算法和面向L4级自动驾驶车辆车路图协同定位感知算法为例进行应用验证。首先,分析算法的流程,并针对算法的场景感知、规划决策等进行仿真系统的应用效果分析。然后,根据算法在平台实时仿真、在线计算的结果,分析系统运行的可行性。

3.1 车道保持算法仿真设计及应用

车道保持算法的作用是帮助车辆在行驶过程中保持稳定地驶入和驶出车道,是L2级的自动驾驶中的一项常用功能,通过自动修正减轻驾驶员的负担,提升行车的稳定性,确保安全行驶和减少事故风险。车道保持算法通过相机的图像数据处理提取车道线信息,通过车道线边缘检测获得车道边缘像素点,进一步地,利用霍夫变换进行车道线的拟合获取车道线的直线方程。在此基础上,结合预设锚点得到车辆的预期轨迹偏差,通过与上个时刻偏差的差值,利用比例和微分控制算法计算得到转向值,控制车辆的转向角度。基本流程如图10所示。

3.1.1 实验场景设置

基于上述对车道保持算法感知、决策、控制过程分析,结合其基本流程,在VIMS平台中进行场景的

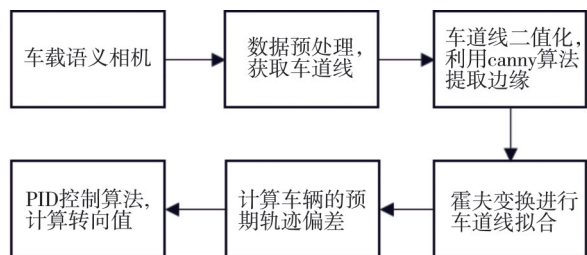


图10 车道保持算法流程

设计。在主世界模块中,首先进行地图的设置,本文选择包含高速公路的地图,其次通过CARLA中的交通管理进行高速公路场景中车辆的生成,最后对智能车进行传感器设置,智能车安装了语义相机,如图11所示,生成相机的语义分割数据。



图11 智能车传感器安装

在运行仿真测试任务时,智能车模块通过订阅对应的ROS话题实时地接收主世界传输的语义相机数据,通过车道保持算法,自动地实现智能车的横向修正。当智能车通过入口匝道汇入主线后,驾驶员通过转向盘上按钮(如图12所示)一键启动车道保持功能,此时智能车由人工驾驶模式转化为自动驾驶模式。



图12 智能车控制模式切换

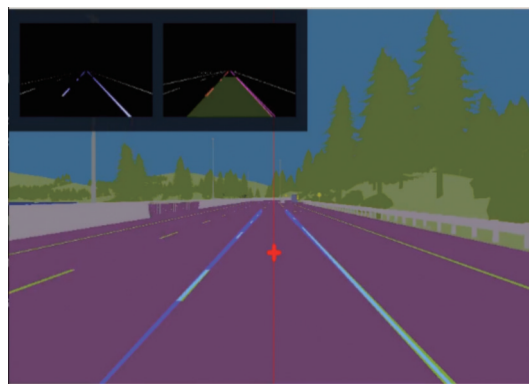
3.1.2 实验结果分析

车道保持算法在VIMS平台应用验证中涉及主世界模块和智能车模块以及两个模块之间的通信。

为了验证VIMS平台各模块间的有机结合和可扩展性,在主世界模块中展示了车辆的驾驶状态,如图13(a)所示,在智能车模块中展示了车道保持算法中的语义相机数据、车道线检测结果和当前车道的驾驶区域,如图13(b)所示。



(a) 主世界运行界面



(b) 智能车运行界面

图13 车道保持效果

本次测试设计了低密度交通场景和高密度交通场景。智能车从主世界接收传语义图像的频率为10 Hz,2个场景接收数据的成功率均为100%。采用距车道中心线的距离作为评价指标对车道保持效果进行分析,以车道中心线为原点,正值表示车辆偏向于车道中心线的右侧,负值表示车辆偏向车道中心线的左侧。

低密度交通场景下,车道保持的效果如图14所示,

平均偏移距离为0.026 m,最大偏移距离为0.14 m,偏移距离标准差为0.039 m。

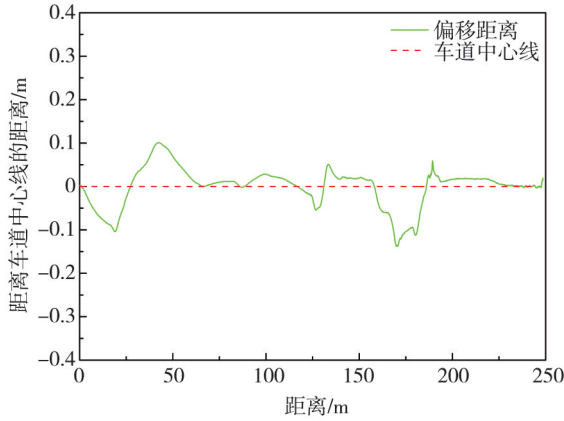


图14 低交通密度下的车道保持效果

高密度交通场景下,车道保持的效果如图15所示,平均偏移距离为0.040 m,最大偏移距离为0.17 m,偏移距离标准差为0.053 m。与低密度交通场景相比,车道保持性能有所下降,主要原因是高交通密度下,车辆之间的互动更加频繁和复杂,出现频繁变道、车流拥堵等情况,影响了车道保持算法的表现。

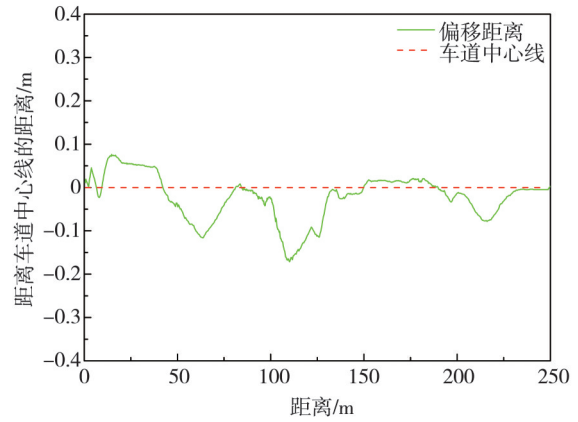


图15 高交通密度下的车道保持效果

3.2 车路图协同定位算法仿真设计及应用

车路协同感知定位算法是为L4级智能网联车辆提供服务的一种关键技术。协同定位技术通过融

合来自其他车辆的位置、路侧单元信息和地图定位等信息来提高定位精度。基于时空图优化(spatial-temporal graph optimization, STGO)的多车协同定位方法^[19]在构建空间约束时,引入了高精地图信息作为横向定位约束,构建了车-路-图观测,通过运动模型建立时间约束,通过最小化时空约束误差建立协同定位时空图模型。将初始时刻到当前时刻的所有顶点和边都加入图优化会导致图模型规模不断增大,通过限定图优化模型中的时间帧数可以有效地减少图优化模型的规模,因此在模型求解时,提出了滑动窗口限制的快速求解方法。基本流程如图16所示。

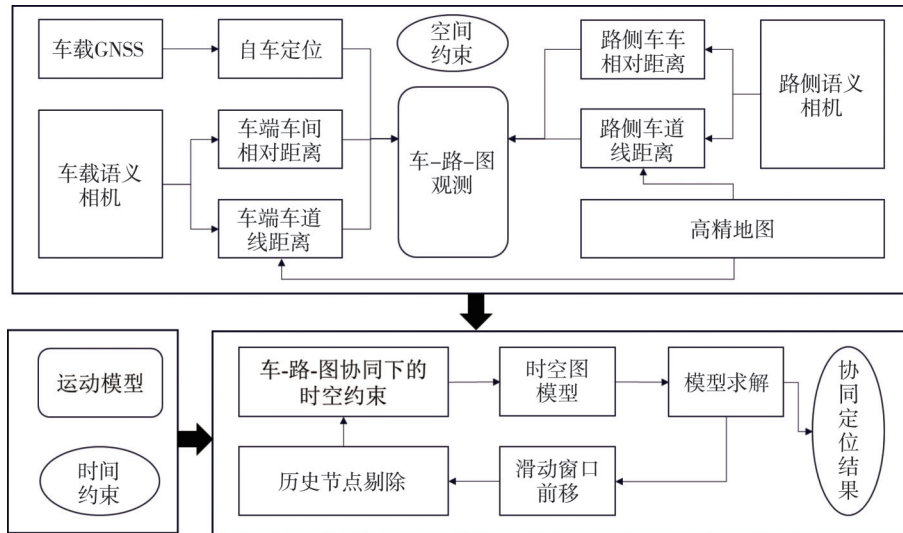


图16 基于时空图优化的多车协同定位方法

3.2.1 实验场景设置

利用本文开发的VIMS仿真平台对该算法进行验证。在主世界模块中,首先进行地图的设置,本文选择城市道路的地图,交通场景如图17所示,其次

通过CARLA中的交通管理器,在场景中生成了5辆智能网联车,然后进行车辆传感器设置,每辆智能网联汽车均安装GNSS和语义激光雷达,最后对智能路侧传感器进行设置,在智能路侧安装了语义激光

雷达。车端、路侧的传感器参数设置见表2。



图17 STGO协同定位实验场景

在运行仿真测试任务时,智能车模块通过订阅对应的ROS话题实时地接收主世界传输的车辆GNSS和语义激光雷达数据,实时计算每辆车的GPS

观测、自车与他车的距离,结合高精地图的车道线信息计算得到自车与车道线的距离。智能路侧模块通过订阅对应的ROS话题实时地接收主世界传输的路侧语义激光雷达数据,实时计算每辆车的位置观测,结合高精地图的车道线信息计算得到每辆车与车道线的距离。随后智能车模块将计算结果传输至智能路侧模块,智能路侧的边缘计算单元进行车路图协同定位算法的求解,将协同定位的智能网联车辆的位置信息传输至高精地图模块并进行可视化。

3.2.2 实验结果分析

为评估协同定位的效果,本文采用均方根误差(root mean squared error, RMSE)作为评价指标对结果进行分析,定义如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{k=0}^{N-1} \| \mathbf{x}_{i,k}^{gt} - \mathbf{x}_{i,k}^r \|^2}{NM}} \quad (1)$$

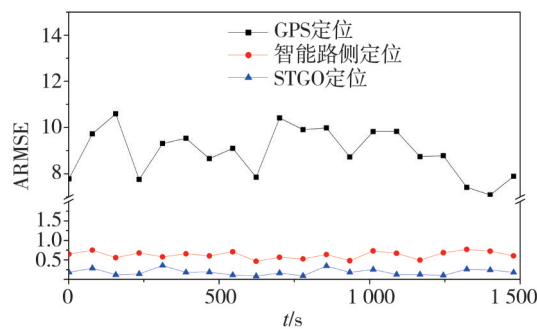
式中: N 为当前累计定位次数; M 为当前定位车辆总数,为5辆; $\mathbf{x}_{i,k}^{gt}$ 为 k 时刻第 i 辆车的位置真值,可通过VIMS平台获得; $\mathbf{x}_{i,k}^r$ 为 t 时刻第 i 辆车的定位结果。

表2 传感器参数设置

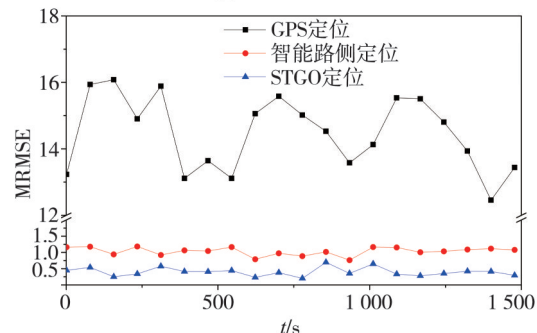
传感器		参数					
		帧率/Hz	线束	水平视场角/(°)	垂直视场角/(°)	扫描半径/m	测量误差/m
车载传感器	语义激光雷达	10	32	360	-30~10	120	
	GPS	10					10
路侧传感器	语义激光雷达	10	128	360	-30~10	200	

将智能网联汽车的定位结果进行分析,比较GPS定位结果、智能路侧定位结果和STGO协同定位的定位结果,如图18所示,其中图18(a)为所有智能网联汽车的平均定位误差(average root mean squared error, ARMSE),图18(b)为所有智能网联汽车的最大定位误差(max root mean squared error, MRMSE)。经过计算和分析,GPS的平均定位误差为10.02 m,智能路侧定位误差为0.64 m,STGO定位误差为0.33 m。结果表明,STGO协同定位的平均定位性能较GNSS单独定位和智能路侧单独定位分别提高了96.7%和48.4%;GPS的最大定位误差为16.2 m,智能路侧的最大定位误差为1.34 m,STGO协同定位的最大定位误差为0.68 m。结果表明,STGO协同定位最大定位性能较GNSS单独定位和智能路侧单独定位分别提高了95.8%和49.25%。可见,STGO协同定位方法能够实现多智能车的定位结果优化,提升智能车的定位精度。

通过本文提出的VIMS平台能够根据算法需求灵活地进行车端、路侧的传感器配置,生成稳定的传



(a) 平均定位误差



(b) 最大定位误差

图18 定位误差

感器数据,并通过分布式的计算架构实现算法的测试与验证。

4 结论

本文提出了面向车-路-图协同的分布式自动驾驶仿真平台,该平台基于CARLA模拟器和ROS进行开发,将车、路、图等信息链接起来,支持驾驶模拟器、整车等各种硬件在环设备的引入,通过分布式通信实现不同模块之间的交互,通过分布式计算增强平台的数据处理能力,结合L2级自动驾驶车道保持算法和L4级自动驾驶车路图协同定位的算法对平台的架构、功能等进行了测试,验证了VIMS平台可以满足不同等级、不同任务的车路协同自动驾驶测试任务。

后续将针对复杂交通环境下,开发不同模块间通信的时间延迟模块,并进一步地引入真实的车路通信单元,实现对多车通信延迟进行的测试研究。

参考文献

- [1] 张毅,姚丹亚,李力,等.智能车路协同系统关键技术与应用[J].交通运输系统工程与信息,2021,21(5):40-51.
ZHANG Y, YAO D Y, LI L, et al. Technologies and applications for intelligent vehicle-infrastructure cooperation systems[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(5):40-51.
- [2] HAN Y, ZHANG H, LI H, et al. Collaborative perception in autonomous driving: methods, datasets, and challenges[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2023, 15(6): 131-151.
- [3] YU H, LUO Y, SHU M, et al. DAIR-V2X: a large-scale dataset for vehicle-infrastructure cooperative 3D object detection[C]. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2022: 21361-21370.
- [4] XU R, XIA X, LI J, et al. V2V4Real: a real-world large-scale dataset for vehicle-to-vehicle cooperative perception[C]. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2023: 13712-13722.
- [5] WANG T H, MANIVASAGAM S, LIANG M, et al. V2VNet: vehicle-to-vehicle communication for joint perception and prediction[C]. 16th European Conference in Computer Vision (ECCV), 2020: 605-621.
- [6] XU R, XIANG H, XIA X, et al. OPV2V: an open benchmark dataset and fusion pipeline for perception with vehicle-to-vehicle communication[C]. International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2022: 2583-2589.
- [7] DOSOVITSKIY A, ROS G, CODEVILLA F, et al. CARLA: an open urban driving simulator[C]. Conference on Robot Learning. PMLR, 2017: 1-16.
- [8] LI Y, MA D, AN Z, et al. V2X-Sim: multi-agent collaborative perception dataset and benchmark for autonomous driving[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(4): 10914-10921.
- [9] KRAJZEWICZ D, ERDMANN J, BEHRISCH M, et al. Recent development and applications of SUMO-Simulation of Urban Mobility[J]. International Journal on Advances in Systems and Measurements, 2012, 5(3&4).
- [10] 赵祥模国家重点研发计划(2021YFB2501200)团队.自动驾驶测试与评价技术研究进展[J].交通运输工程学报, 2023, 23(6): 10-77.
ZHAO Xiang-mo's Team Supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFB2501200). Research progress in testing and evaluation technologies for autonomous driving[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(6): 10-77.
- [11] 胡耘浩,李志强,向云丰,等.智能网联汽车通用跨平台实时仿真系统架构及应用[J].汽车工程, 2023, 45(3): 372-381.
HU Y H, LI K Q, XIANG Y F, et al. The universal architecture and application of cross-platform real-time simulation system for intelligent connected vehicles[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(3): 372-381.
- [12] 赵树廉,来飞,李志强,等.基于数字孪生技术的智能汽车测试方法研究[J].汽车工程, 2023, 45(1): 42-51.
ZHAO S L, LAI F, LI K Q, et al. Research on intelligent vehicle test method based on digital twin technology[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(1): 42-51.
- [13] 刘经南,詹骄,郭迟,等.智能高精地图数据逻辑结构与关键技术[J].测绘学报, 2019, 48(8): 939-953.
LIU J N, ZHAN J, GUO C, et al. Data logic structure and key technologies on intelligent high-precision map[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(8): 939-953.
- [14] YANG B, LIANG M, URTASUN R. HDNET: exploiting HD maps for 3D object detection[C]. Conference on Robot Learning. PMLR, 2018: 146-155.
- [15] 余荣杰,田野,孙剑.高等级自动驾驶汽车虚拟测试:研究进展与前沿[J].中国公路学报, 2020, 33(11): 125-138.
YU R J, TIAN Y, SUN J. Highly automated vehicle virtual testing: a review of recent developments and research frontiers[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(11): 125-138.
- [16] SHAN T, ENGLLOT B. LeGO-LOAM: lightweight and ground-optimized lidar odometry and map on variable terrain[C]. 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018: 4758-4765.
- [17] SHAN T, ENGLLOT B, MEYERS D, et al. LIO-SAM: tightly-coupled lidar inertial odometry via smoothing and map[C]. 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2020: 5135-5142.