



引文格式:李必军,郭圆,周剑,等.智能驾驶高精地图发展与展望[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(4):491-505.DOI:10.13203/j.whugis20230287

Citation: LI Bijun, GUO Yuan, ZHOU Jian, et al. Development and Prospects of High Definition Map for Intelligent Vehicle[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(4):491-505. DOI:10.13203/j.whugis20230287

智能驾驶高精地图发展与展望

李必军¹ 郭圆² 周剑¹ 唐有辰¹ 董全华³ 李治江^{4,5}

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

3 北京大学地球与空间科学学院遥感与地理信息系统研究所,北京,100871

4 武汉大学图像传播与印刷包装研究中心,湖北 武汉,430079

5 武汉大学信息管理学院,湖北 武汉,430079

摘要:高精地图的发展在智能交通的推进中发挥着关键作用,是打造智能汽车与智慧城市“数据大脑”的基石,同时可推动智慧物流网络与交通安全风险监测网络的发展。从地图信息传输模型的角度出发,对已有的高精地图模型进行了分析,提出基于地图认知机理构建高精地图的思路,并对国内外高精地图格式标准进行了对比,提出了中国智能驾驶高精地图在标准编制时应遵循的原则。同时,从地图采集、处理与审核等维度展开,分析了当前高精地图生产与更新的关键技术,并通过车辆的规划与感知等应用实例,对高精地图的应用现状进行了分析。中国高精地图发展面临着模型复杂、生产更新能力难以满足发展需要、地理信息安全风险以及应用深度不足等挑战。针对以上挑战,所提出的基于认知模型建立高精地图闭环架构的思路,强调了保障数据安全、推动智能审图的重要性,指出了高精地图的广泛应用前景。

关键词:高精地图;认知地图;智能驾驶;人工智能

中图分类号:P208

文献标识码:A

收稿日期:2023-06-21

DOI:10.13203/j.whugis20230287

文章编号:1671-8860(2024)04-0491-15

Development and Prospects of High Definition Map for Intelligent Vehicle

LI Bijun¹ GUO Yuan² ZHOU Jian¹ TANG Youchen¹ DONG Quanhua³ LI Zhijiang^{4,5}

1 Skate Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Institute of Remote Sensing and Geographical Information Systems, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

4 Research Center of Graphic Communication, Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430079, China

5 School of Information Management, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: The development of high definition (HD) map is of paramount importance in advancing the digital infrastructure of transportation and serves as a fundamental component in creating the “data brain” of intelligent vehicles and smart cities. Furthermore, it promotes the growth of intelligent logistics networks and traffic safety risk monitoring systems. **Methods:** The existing HD map models are analyzed from the perspective of map information transmission models, and the concept of constructing HD map models based on map cognition mechanisms is introduced. It also provides an overview of domestic and international standards for HD map formats. Moreover, the principles to be followed in the compilation of HD map for intelligent driving in China are outlined. Additionally, key technologies involved in HD map production and updates are explored, with a particular focus on map collection, processing, and verification. The current application status of HD map is analyzed through the examination of examples such as vehicle planning and perception. **Results:** The development of HD map has made significant progress, but it

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2501101);国家自然科学基金(42201480,42101448)。

第一作者:李必军,博士,教授,主要从事智能网联汽车与高精地图研究。lee@whu.edu.cn

通讯作者:郭圆,博士,博士后。guoyuan@whu.edu.cn

also encounters difficulties and challenges. Existing HD map models tend to be complex and lack sufficient representation of dynamic elements, resulting in difficulties in maintaining real-time accuracy. Additionally, the production capacity of HD map remains insufficient to meet the demands of development, and challenges related to geographic information security and limited application depth persist. **Conclusions:** A concept of establishing a closed-loop architecture for HD map using cognitive models is introduced. It highlights the significance of ensuring data security and promoting intelligent verification of maps and emphasizes the extensive application prospects of high-precision maps. During the research process of HD map, it is crucial to collaboratively address the difficulties and challenges, which can promote HD map to better serve intelligent transportation and societal development.

Key words: high definition map; cognitive map; intelligent vehicle; artificial intelligence

石器时代,人类使用简单的线条与符号对生活环境进行描述,形成了原始的地图。随着农业的发展,古人使用简单的测量工具与方法在陶片、丝帛、芦苇等载体上对地图进行记录^[1]。测量方法的改进促使更高精度、更大范围的纸质地图逐渐出现。在20世纪后期,手工制图方法被全电子化的数字制图工艺替代,地图进入新时代。随着城市化与汽车普及率的不断提高,交通需求大幅增加,出现了导航电子地图新分支。与此同时,在信息技术、传感器技术与人工智能等技术的赋能下,汽车智能化进一步加速,对导航电子地图提出新需求,高精地图应运而生且发展迅速^[2]。高精地图是一种主要用于高级别辅助驾驶和智能驾驶的专用电子地图,是一个涵盖测绘科学、人工智能等多学科交叉的领域,它通过多源传感器进行数据采集与清洗,以获取丰富、细粒、高精的道路地理信息,并采用标准化的格式进行存储与管理。作为数字交通的主要表现形式之一,高精地图在智能汽车的发展过程中具有重要地位与作用,它是智能汽车进行环境认知的知识库、空间基准,是不受干扰的信息源,也是智能交通全时空实时感知的载体与运行管理的依据^[3]。

高精地图不仅是导航电子地图的升级,还涉及高精度定位、数据融合、环境感知、知识图谱、云计算等关键技术,与导航电子地图相比,具有高精度、高动态、高细粒度、高可靠等特性。一方面,其服务对象包括机器与人类,除了智能驾驶,高精地图还可作为核心数字基础支撑广泛的上层应用,如智慧城市、智慧旅游、物流配送等^[4];另一方面,高精地图具有更高的绝对精度、相对精度与更新频率,包含丰富的动静态道路信息以支持车辆实现高精度定位、空间认知、记忆、决策与规划。

目前对于高精地图的研究主要集中在表达

模型、要素提取、众源更新几个方面,针对高精地图的综述性研究较少。本文从高精地图的模型与格式标准、生产与更新、安全处理与审查以及应用4个方面出发,分析总结了高精地图的研究现状及其所涉及的关键技术,并对高精地图的发展趋势进行了展望。

1 高精地图模型与格式标准

1.1 高精地图模型

传统地图模型是将人类对空间认知的结果进行固化与抽象^[5],而高精地图是智能汽车进行环境认知的重要工具,需从机器人角度对环境进行抽象。高精地图模型决定了地图的制作内容,关系到地图的制作工艺,影响地图的物理编码与应用,高效、合理的地图模型对促进高精地图的发展具有重要作用^[6]。

文献[7]提出的地图信息传输模型描述了地图信息的传输路径,对导航电子地图模型的构建具有重要指导意义。传统导航电子地图的道路模型经历了从单线单结点到双线多结点的变化过程^[8]。在智能驾驶技术发展的早期,地图在系统中未起到关键作用,使用的地图通常被称为驾驶辅助地图或车道级地图^[9-11],由道路网络层、车道网络层、车道线层以及交通标志层4部分内容组成,通过线段与结点的方式描述道路与车道的拓扑结构^[12-15]。车道级地图的模型是在传统导航电子地图的基础上,由道路扩展至车道,集中于静态地图要素的描述,其表达能力有限,语义不丰,无法满足L3以上智能驾驶技术对高精地图提出的高动态、自适应等要求。

根据智能驾驶汽车对高精地图应用场景与实时性的不同需求,博世在欧洲协同式智能交通系统项目中提出了局部动态地图模型^[16],除了静态地图与准静态地图,该模型还加入准动态地图

与动态地图。为了使高精地图可有效支持不同类型的导航需求,文献[17-18]提出了一种七层地图模型,该模型包含路网层、宏观动态层、中间层、车道层、虚拟传感器层、动态障碍物层以及驾驶员层,如图1所示。

由于传统地图信息传输模型无法满足机器

人环境认知的需求,文献[3]在经典Kolacny地图信息传输模型的基础上,提出了用7元组表示的智能高精地图信息传输模型,并基于该传输模型提出了包含静态地图层、实时数据层、动态数据层以及用户模型层的四层一体化模型,如图2所示。

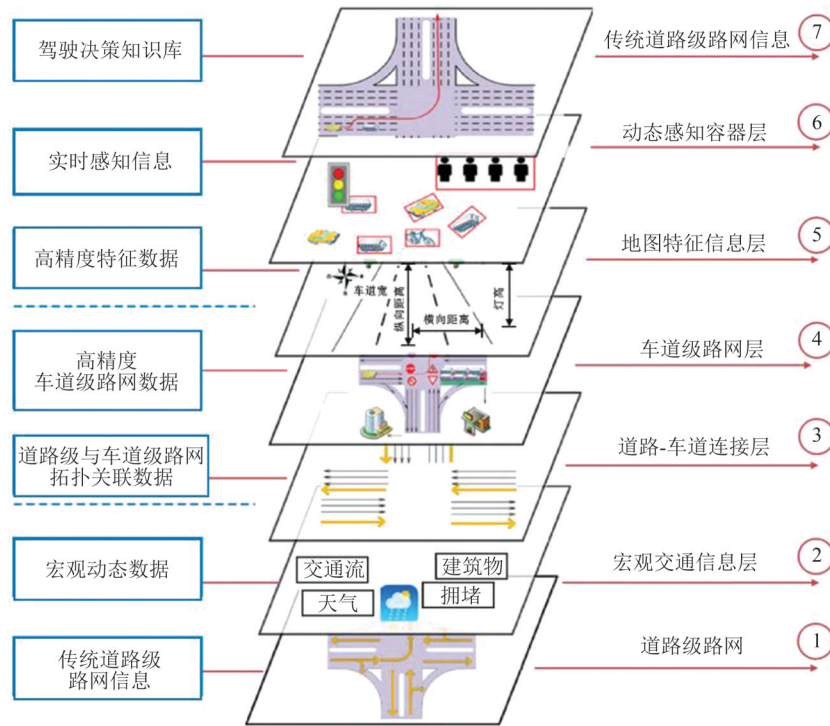


图1 七层地图模型^[17]

Fig. 1 7 Levels Expression Model of High Definition Map^[17]

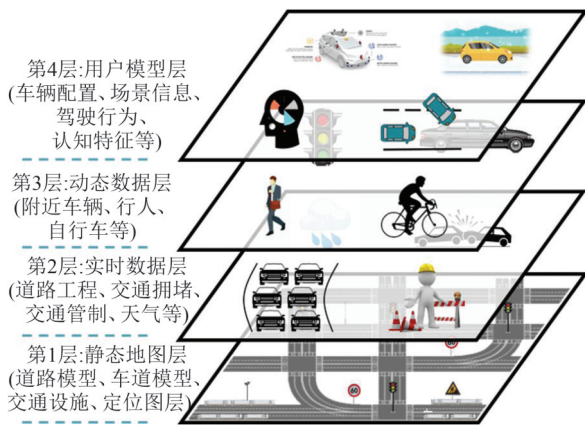


图2 四层一体化地图模型^[3]

Fig. 2 4 Levels Expression Model of High Definition Map^[3]

高精地图模型经历了由轻至重、由静态至动态的演进过程,但已有地图模型多是基于传统地图信息传输模型,难以充分满足高度智能化的驾驶汽车在复杂场景的环境认知需求。同时,已有模型的复杂性使得高精地图采集成本较高、更新效率较低,制约了其在规模化应用方面的进展。

神经科学家们在哺乳动物大脑的海马结构与内嗅皮层中发现与地图认知有关的位置细胞、栅格细胞、边界细胞以及头朝向细胞^[19-22],从脑科学角度证明了动物具有建立复杂环境心象地图的能力,并可基于该地图进行导航、规划等空间任务。以上发现为下一步脑科学与人工智能的开发指引了方向,为地图学的创新打下了科学基础,同时也为智能驾驶高精地图的构建提供了新思路。

智能驾驶领域通过借鉴大脑空间认知的机制构建高精地图认知模型,使智能驾驶汽车更好地理解、认知道路环境。该模型结合车辆自身的运动情况和地图特征,通过特征检索和确认算法计算车辆与静态和动态环境之间的交互关系,从而帮助智能驾驶系统更准确地感知周围环境,做出准确的驾驶决策,保障行驶安全。此外,基于心象地图构建机理的高精地图认知模型不容易受尺度变化和基准偏差的影响,在不同尺度和环境条件下,仍能够有效地应用于智能驾驶系统。

因此,基于心象地图建立高精地图认知模型思路可提高智能驾驶系统的鲁棒性、自适应性和行驶安全性,为智能交通和智能驾驶技术的发展带来了新的可能性和前景。

1.2 高精地图数据格式标准

高精地图格式是在地图模型的基础上对空间数据的组织进行定义,与传统导航电子地图一致,高精地图格式包括母库格式、交换格式与物理应用格式^[6]。母库格式在地图模型的基础上,对地图要素数字化并进行存储、管理的格式;交换格式采用标准化的数据结构与编码方法在不同地图系统中实现数据互通与共享的标准化格式;而物理应用格式则是地图数据在存储介质中的实际存储方式。对于母库格式,不同的地图生产商依据生产经验有一套内部存储的格式,因此当前高精地图格式标准主要致力于交换格式与物理应用格式的制定。

1)交换格式。当前国际上主流的电子地图交换格式为地理数据文件(geographic data files, GDF)^[23],20世纪80年代后期,欧洲标准化委员会起草了GDF,为地图供应商与导航系统集成商之间交换地图数据提供了互操作性,为促进欧洲车载导航市场的发展发挥了重要作用。随着智能驾驶技术的发展,智能交通的应用已扩展至多智能体协作,地图交换格式需容纳来自于多个提供者的地图信息,并支持与外部数据库进行连接。2020年发布的GDF 5.1规定了智能交通系统应用与服务的地理数据库的物理编码格式,以及智能交通系统数据的概念与逻辑模型,并进一步定义了用于智能驾驶、协同智能交通系统与多式联运系统中使用的地图数据。

中国高精地图的标准制定尚处于起步阶段,相关标准多处于立项或征求意见阶段^[24-25]。针对现有导航地图存在的精度不统一、模型不统一、表达不统一等问题,中国国家市场监督管理总局于2023年6月发布了《智能运输系统 智能驾驶电子道路图数据模型与表达 第1部分:封闭道路》与《智能运输系统 智能驾驶电子道路图数据模型与表达 第2部分:开放道路》两项国家标准。由于高速公路、城市快速路等封闭道路与开放道路之间的交通要素存在明显差异,因此该标准对封闭道路与开放道路的数据模型与表达格式分别进行了规定,符合中国道路交通特色,有助于中国高精地图业务的落地。

2)物理应用格式。当前国际主流的高精地

图物理应用格式规范为导航数据标准(navigation data standard, NDS)与OpenDRIVE^[26-27]。NDS是面向汽车生态系统的车载导航电子地图物理应用格式,使用标准化的二进制数据库技术对导航数据进行管理,实现不同系统之间的数据交换。NDS根据功能的不同,导航数据被组织成不同的构建块,NDS 2.5中与智能驾驶有关的构建块包括道路、车道、障碍物、定位地标等,如图3所示。

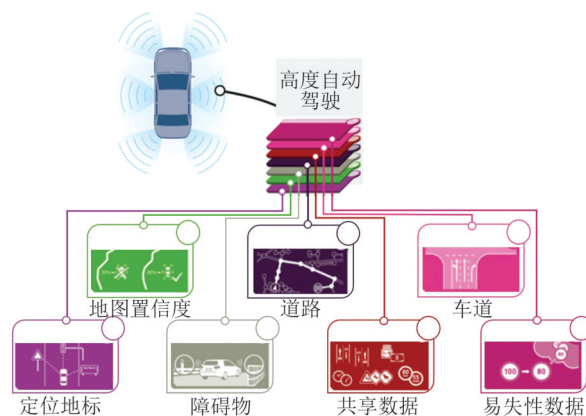


图3 NDS构建块^[26]

Fig. 3 Building Block of NDS^[26]

与NDS不同,OpenDRIVE是由德国自动化及测量系统标准协会制定并推广的智能驾驶场景模拟仿真测试标准之一。OpenDRIVE文件格式为可扩展标记语言(extensible markup language, XML),其逻辑组织模型为基于XML的多层次树状结构,所有静态道路数据均组织在节点中^[25,27]。OpenDRIVE的XML文件共包括8层,如图4所示。OpenDRIVE中所有的描述道路形状与属性的几何要素如车道、标牌等均是基于参考线与偏移方程进行定义,具有数据量小的优点。然而,智能驾驶汽车通常使用点信息辅助车辆进行决策与规划,基于参考线与偏移方程的方式较为复杂,给车辆的规划模块带来不便。百度阿波罗结合实际智能驾驶应用情况对OpenDRIVE进行了改进,使用绝对坐标序列对道路边界与车道线进行描述,且增加了禁停区、人行横道以及减速带等元素的描述^[28]。

当前国际上的高精地图格式标准主要由欧洲主导,为促进高精地图的发展,中国出台了一系列关于高精地图要素采集、生产以及交换的相关标准,逐步完善了中国高精地图相关标准体系。中国道路具有复杂场景多、更新频率快等特征,这对高精地图的生产与更新提出了更高的要求,为促进高级别智能驾驶的落地,亟须开发具

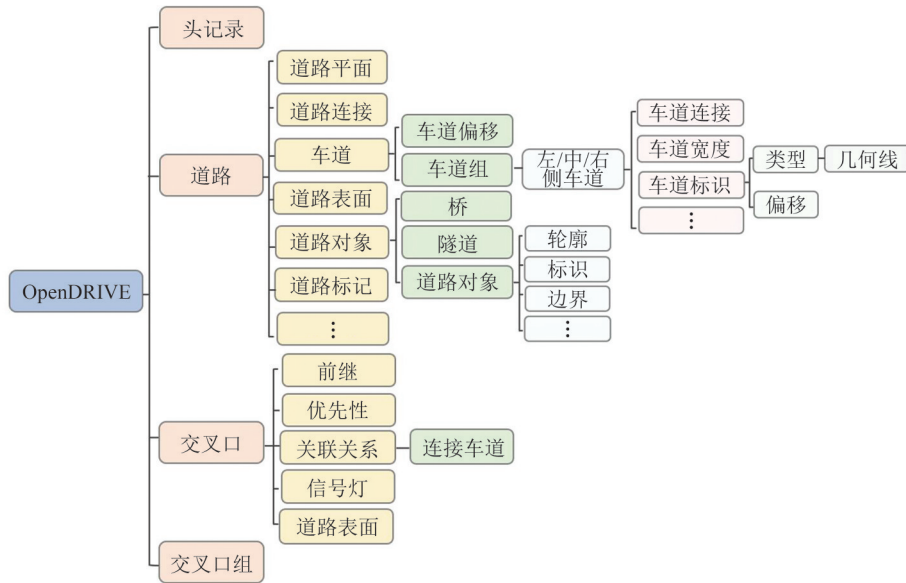


图 4 OpenDRIVE 多层次树状结构^[27]

Fig. 4 Data Structure of OpenDRIVE^[27]

有中国道路特色的高精地图物理应用格式标准。同时,高精地图格式标准的制定还需与智能驾驶应用相匹配,与国外相关标准相兼容,使高精地图格式标准具备国际互操作性,有助于促进国际智能交通合作与交流,有利于加速全球智能驾驶技术的推进与应用。

2 高精地图生产与更新

高精地图的生产需经过数据采集、数据处理与验证几个步骤,如图 5 所示,其关键技术主要包括卫星精密定位、即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)、路面提取、路沿提取、标线提取、杆状物提取、众包更新等。



图 5 高精地图生产流程

Fig. 5 Production Process of High Definition Map

2.1 卫星精密定位

高精地图采集过程中,连续可靠的高精度定位信息至关重要,全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)容易受系统误差(星历误差、钟差等)与随机误差(多路径效率、噪

声等)的影响,为保障地图的精度,需对卫星定位误差进行消除,实现定位增强。常用的卫星定位增强方法包括实时动态载波相位差分技术(real-time kinematic, RTK)与载波相位事后差分技术(post-processing kinematic, PPK)等。RTK 通过将基准站采集的载波相位发送至流动站,构建双差观测值,从而减少系统误差对定位精度的影响^[29]。RTK 技术效率高,可获得实时高精度定位信息,但是需要在流动站与基准站之间建立实时的通信连接,在卫星信号或无线通信不稳定的情况下,精度无法保证^[30]。PPK 属于 GNSS 动态后处理测量技术,与 RTK 不同,PPK 技术使用载波相位进行事后差分,无需在流动站与基准站之间建立实时的通信连接^[31],作业半径更大,适合长距离大范围高精地图的采集。

除卫星定位信息,高精地图采集还可通过 GNSS 与惯性导航系统(inertial navigation system, INS)组合(GNSS/INS)的形式构建连续可靠的时空基准传递,实现传感器局部感知数据在大地球参考空间的统一表达。INS 包含惯性测量单元与解算单元,通过与 GNSS 的融合,可实时推算出采集车辆的速度、位置与姿态信息^[32]。GNSS/INS 组合导航主要包括松耦合与紧耦合两种形式,松耦合结构中,GNSS 与 INS 独立工作,通过滤波器输出组合导航结果;紧耦合中 GNSS 的原始观测值不经过解算,直接输入滤波器中与 INS 组合。相对于松耦合,紧耦合方式在卫星数量较少时,依然可以提供 GNSS 信号更新,鲁棒性更强^[33],在高精地图采集中应用较为

广泛。

2.2 SLAM

GNSS/INS组合导航为高精地图采集提供了绝对位姿信息,然而在地下停车场、隧道、高架桥下等应用场景的高精地图采集中,GNSS信号难以接收。随着SLAM技术发展日趋成熟,背包式、手持式以及机器人式等SLAM技术被广泛应用于城市地下空间、矿洞等无GNSS应用场景的高精地图构建,如图6所示,与采集车相比具有灵活自主、高效率的优势。



图6 SLAM扫描系统

Fig. 6 SLAM-Based Mapping Tool

根据传感器类型,SLAM技术主要可分为基于视觉的SLAM与基于激光的SLAM。激光SLAM通常搭载2D或3D激光雷达对室内环境进行扫描,与2D激光雷达相比,3D激光雷达可获得大量具有角度与距离信息的点云数据,能反映出真实环境的几何信息^[34]。根据算法理论的不同,激光SLAM又可分为基于滤波的激光SLAM与基于图优化的激光SLAM,基于滤波的激光SLAM算法通常使用扩展卡尔曼滤波、粒子滤波等实时处理数据估计位姿,经典算法包括Fast-SLAM^[35-36]、Gmapping^[37]等。基于图优化的激光SLAM算法将机器人位姿视为顶点,位姿间关系视为边,而后进行图优化,调整位姿顶点尽量满足边的约束,常用算法包括LOAM^[38-39]、Cartographer^[40]、Karto SLAM^[41]等。

基于视觉的SLAM算法使用相机获取环境信息,根据相机类型的不同,可分为单目相机、双目相机与深度相机^[42]。单目视觉SLAM使用单个相机采集数据,无法直接获取可靠的绝对深度信息;双目相机通常由左右眼相机构成,基于基线几何约束原理匹配左右眼相机图像,估计物体深度信息。深度相机与单目、双目相比,采集的数据更为丰富,常被用于室内建图^[43]。近年来,常用的室内高精地图构建视觉SLAM经典算法有ORB-SLAM^[43-45]、SVO-SLAM^[46]、LSD-SLAM^[47]等。此外,与深度学习结合的SLAM方法也成为

当前的研究热点,基于深度学习方法可更好地理解环境语义信息,提高数据关联的准确性,提升算法的鲁棒性与泛化能力,常用算法有DeepVO、SuMa等^[48-50]。

2.3 路网数据提取

路网数据是高精地图的基础要素,主要用于描述道路整体的几何位置与形态。常用的路网数据可基于遥感影像、浮动车轨迹等进行提取。根据道路提取结果,基于遥感影像的路网提取可分为道路区域提取与道路中心线提取两类^[51]。道路区域提取方法通常使用形态学特征^[52]、手工特征^[53]或自动特征提取^[54]的算法对遥感影像进行分割与分类,道路中心线提取方法则侧重于道路骨架的检测,通过使用形态学算法对遥感影像进行细化与追踪^[55]。基于遥感影像的方法提取道路信息容易受到遮挡、光照等因素的影响,缺乏鲁棒性。

基于浮动车轨迹的路网提取通常包括数据清洗、交叉口提取与拟合3个步骤。浮动车轨迹数据的清洗是从原始数据中去除噪声与异常值,获得高质量、可靠的轨迹数据,常用方法包括基于规则模型的方法^[56]、基于滤波的方法^[57-58]与基于空间聚类^[59-60]的方法3种。交叉口提取是路网信息提取的重点之一,基于浮动车轨迹的交叉口提取可分为栅格法与聚类法两类。栅格法将矢量轨迹数据转换为栅格图像,继而通过形态学方法进行处理,提取交叉口^[61];聚类法是基于轨迹的角度与速度特征区分交叉口^[62-63]。栅格化方法所提取的交叉口精度受栅格大小、数据密度分布是否均匀等因素的影响较大,精度较低,丢失了大量的道路拓扑结构信息。与栅格化方法相比,基于聚类的方法对交叉口的提取精度更高,但该方法算法复杂且计算量大、效率低。路网的拟合是指将属于同一道路的轨迹数据聚合,常用方法有最小二乘法^[64-65]、物理引力模型法^[66]等。与高精地图中的其他要素相比,路网的提取方法已较为成熟,浮动车轨迹、手机定位数据、遥感影像等数据的数据量庞大且分布广泛,是路网提取的重要途径。

2.4 路沿提取

路沿信息可辅助高精地图确定路面可行驶区域,是构建高精地图的基础信息之一。激光点云与视觉影像是提取路沿信息的两大数据来源,基于激光点云的路沿提取一般包括路沿点提取、拟合与跟踪3个步骤,具体方法有栅格图法、特征

提取法以及无向图法^[67]。栅格图法将点云转换为栅格图,使用梯度、法向量等检测路沿点并拟合提取路沿信息^[68];特征提取法通过高度差、切向量等空间特征提取路沿点,再通过滤波算法去除噪声,提取路沿^[69];无向图法则使用路沿局部特征通过无向图提取路沿点,再使用聚类算法去除噪声点,提取路沿^[70]。

基于单目相机的路沿信息提取多使用深度学习算法对图像进行语义分割,文献[71]提出了一种特征提取卷积神经网络,识别路沿区域与非路沿区域;文献[72]提出了一种具有双支路特征融合的实时路沿分割网络,整合深层语义信息与浅层空间特征进行路沿提取。在基于单目相机的路沿提取过程中,虽然可以通过图像处理和特征检测等技术来寻找图像中的边缘和纹理信息,但由于缺乏尺度信息,无法准确判断路沿的实际位置和高度。另外,在实际道路环境中,路沿的位置和形状可能会受多种因素的影响,例如光照条件、路面材质和车辆位置等,这些因素都会导致路沿的图像表现复杂多样,难以精准提取。因此,基于视觉的高精地图路沿信息提取多采用立体相机,通过高度差信息提取路沿点^[73-75]。

对于高精地图路沿信息的提取,无论是激光雷达或立体相机的方法,都面临着受障碍物遮挡、道路破损等因素影响的问题,导致提取结果的稳定性较弱、准确度较低。虽然两种传感器都面临一些挑战,但 3D 激光雷达相对不易受光照变化的影响,表现出更高的鲁棒性。然而在实际应用中,通常使用多传感器融合的方式,以进一步提高路沿信息的提取准确性与鲁棒性。

2.5 道路标线提取

道路标线包括车道线、方向箭头、人行横道、停止线等,可辅助智能驾驶车辆进行定位与规划,是高精地图的重要组成部分之一。道路标线的施工需遵循相应的国家标准,标线的形状、材质、尺寸均需满足统一要求,因此,道路标线的提取方法多是基于亮度差与几何外观信息。传统基于视觉的道路标线提取方法多使用几何特征与亮度特征进行识别与分割,Sobel与Canny算子常被用于道路标线的提取^[75-79]。随着大规模标注样本的增多,基于深度学习的方法发展迅速,并逐步取代传统视觉方法。基于深度学习的道路标线提取以语义分割为主,基于分割的方法将标线的检测转化为像素分类的问题,将每一像素分为前景与背景,比较常用的网络有DeepLab^[80]、

SegNet^[81]、Unet^[82]等。

基于激光点云的地面标线提取同样可分为传统方法与深度学习方法,传统方法一般包括地面分割、标线提取与聚类几个步骤。地面分割通常采用布料模拟算法^[83]、阈值法^[84]等获取地面点云并去除地面上不需要的物体,然后使用反距离加权差值算法将点云数据转换为栅格图像,利用标线与地面的强度差异信息,通过自适应二值化阈值、差分直方图、最大类间方差法等算法提取标线信息。受到地面磨损、噪声等因素的影响,所提取的地面标线可能存在不完整的问题,通常需要使用中值滤波、高斯混合模型等算法去除噪声点,获取完整标线信息。基于深度学习的道路标线提取是当前的研究热点,文献[85]使用了自上而下的两步深度学习算法提取道路标线。文献[86]使用DeepLab V3+模型自动提取标志,并结合聚类分割与矢量化方法将提取结果进行矢量化。道路标志的提取是高精地图构建中的重要环节,也是关键技术挑战之一,道路上标志种类较多,增加了提取算法的复杂性,而交通场景的多样性与环境的变化增加了提取难度。但基于深度学习的方法在高精地图道路标线的提取过程中已取得一定成果,可在一定程度上提高道路标志提取的准确性与实时性。

2.6 杆状物提取

高精地图中的杆状物包括交通信号灯、交通标牌、路灯杆等,其位置相对固定,可辅助智能汽车实现高精度定位。杆状物的提取以激光点云为主,图像数据主要用于提取杆状物的语义信息。传统的基于激光点云的杆状物提取大致可分为基于形状、基于特征、基于机器学习的方法等^[87]。基于形状的方法根据杆状地物为圆柱状的特点,使用最小二乘或随机样本一致算法拟合构建圆柱模型^[88];基于特征的方法从点云中提取几何、亮度或密度特征,使用计算机视觉算法或聚类算法提取杆状地物^[89];基于机器学习的方法通常使用高斯混合模型、支持向量机以及卷积神经网络等^[90]提取杆状地图信息。

总体而言,道路标线、路沿以及杆状物等要素的种类繁多、形状不一,在不同交通场景中存在多样性。此外,路面交通的复杂性,使得各类要素在提取过程中都面临着各自的挑战,包括光照变化、障碍物遮挡、污损等。已有提取方法难以满足高精地图提出的高精度以及高完整性要求,容易出现误提取、漏提取的情况。另外,要素

提取的自动化、智能化程度仍有待提高,尤其是在大规模地图数据中实现高效、准确的要素提取仍是一个具有挑战性的任务。

2.7 众源更新

高精地图的维护与更新是当前的重点与难点,集中式的专业测绘难以实现对道路的全时空实时覆盖,有学者提出基于机器人、智能驾驶车辆、无人机等多类型智能体的高精地图协同构建方法,但仍难以降低高精地图采集成本。众源制图是基于低成本量产器件提出的新型测绘手段,可通过大规模要素自动提取实现自动测图,以较低的成本完成地图更新。高精地图众源更新所涉及的关键技术包括数据清洗、要素提取、要素匹配、边缘计算等。文献[91]研究了众源数据采集过程中的车辆选择问题,提出了一种地图采集优化算法,以达到降低数据采集成本、提高数据质量的目的。文献[92-93]提出了基于众源数据的高精地图要素提取方法,通过深度学习与视觉SLAM算法获取车道标线,实现地图更新。文献[94-95]则提出了高精地图的变化检测与地图更新触发算法。

众源更新是业内公认的高精地图未来形态^[3],但一方面现有众源平台连续定位精度不一致以及设备集成度低等问题,导致数据存在粗质的问题,精度难以达到高精地图的要求;另一方面众源数据在采集、传输、共享与使用的过程中安全隐患较多,容易存在地理信息数据的安全问题。因此,众源数据的精度改正,以及数据的脱敏、脱密是当前的研究重点之一,应提高众源数据的高精度时空表达能力,也应保障众源制图的全流程安全可控。

3 高精地图安全处理与审查

在确保国家地理信息安全的前提下,促进高精地图的发展与创新是一个重要的课题。根据《加强自动驾驶地图生产测试与应用管理的通知》以及《关于导航电子地图管理有关规定的通知》,中国高精地图需参照导航电子地图法规进行管理,其要素空间位置需进行保密处理,造成一定精度损失。为了解决高精地图保密处理带来的形变与精度损失,新地理信息保密处理技术的研究迫在眉睫,对于促进高精地图的落地与发展具有重要意义。

对于高精地图的审查,中国已发布了高级辅助驾驶电子地图审查要求征求意见稿,该要求规

定了0~3级智能汽车驾驶自动化系统公开使用的高级辅助驾驶电子地图总体要求,以及形式审查、内容审查和审查以及判定要求,有助于提高地图质量,并确保地图数据的安全性。但现有审图方式仍以人工为主,需要大量的时间与人力资源,难以应对高精地图的庞大数据量。针对高精地图的审核,应发展以知识为引导、算法为基础的混合智能审核方法^[96],一方面可利用自动化技术对大量数据进行快速处理与审核,提高审图效率,另一方面可节约大量的人力资源与时间成本,有助于推动高精地图的普及与应用。文献[97]借鉴智能化测绘的思路,对审图专家经验知识进行挖掘、提取、描述与表达,并与地图审核的深度学习算法级联耦合,构建了地图智能化审核技术框架。但现有针对智能审图的研究较少,所涉及的审图知识图谱构建、机器学习算法以及在线群智计算等关键技术仍有待突破。

4 高精地图的应用

目前,对于高精地图的应用多集中于智能汽车的定位、规划与感知模块。基于高精地图的定位方法首先使用相机或激光雷达等传感器进行环境感知,识别车道标线、道路标识、杆状物等具有定位属性的特征,然后通过特征匹配算法,如最近点迭代法,与高精地图进行匹配,实现车辆的高精度定位^[98-100],克服GNSS在多路径效应影响下的定位不稳定问题。

对于智能汽车的运动规划模块,高精地图提供了道路边界信息、连接关系、交通规则等先验知识,可生成符合真实交通场景的路径。传统的车辆运动规划算法通常结合车辆运动学原理与高精地图,生成路径集合,并通过路径选择算法获取最优路径^[101]。文献[102]提出了一种高精地图引导快速探索随机树方法,该方法基于高精地图的车道与道路边界信息构建碰撞风险地图,为后续的规划算法提供先验信息与启发式指导,如图7所示。目前,基于高精地图的运动规划已在实际场景中得到应用,文献[103]针对最后一千米配送问题,提出了特定的高精地图表示方法,并在路径规划层中基于路线与高精地图生成平滑的运动可行参考线,该方法在京东自动配送机器人中得到验证。

目前,基于高精地图增强的环境感知也逐渐受到关注,但已有方法多将高精地图作为鸟瞰图(bird's-eye-view, BEV)分割任务的真值,未将高

精地图丰富的要素信息充分利用起来。文献[104]设计了一个单阶段检测器,可以从高精地图中提取几何、语义特征,在BEV视角下,融合点云数据进行三维目标检测,证明了高精地图可以为环境感知提供强大的先验信息,提高智能驾驶环境感知器的性能。文献[105]提出了一个基于高精地图的三维目标检测框架,可实现高精地图的特征提取,然后与激光点云BEV特征融合,实现三维目标检测。但以上方法中,高精地图与感知数据的融合过程较为简单,仅将地图信息作为一种额外的输入,高精地图的作用未能得到充分的探索。为此,文献[106]提出了一种MENet算法,如图8所示,利用注意力机制融合地图和激光点云数据的BEV特征,并使用高精地图中的先验信息辅助目标检测器的数据增强,与以上算法相

比,MENet的注意力机制可更好地融合多模态特征。

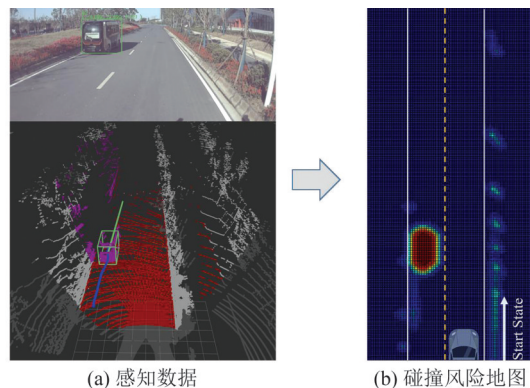


图 7 基于高精地图的碰撞风险地图生成^[102]

Fig. 7 Generation of Collision Risk Map Based on High Definition Map^[102]

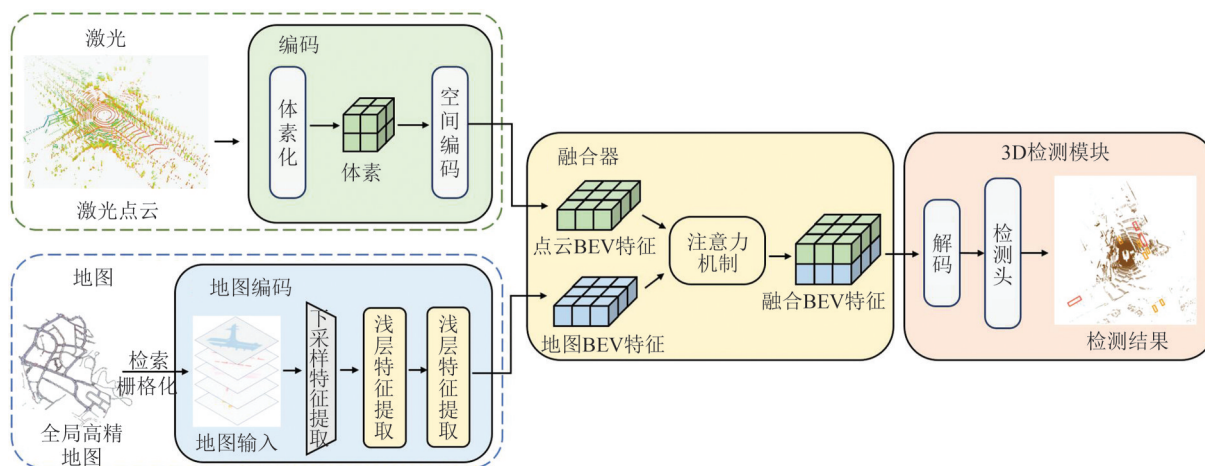


图 8 MENet网络结构图^[106]

Fig. 8 Network Structure of MENet^[106]

基于高精地图增强的定位、运动规划与环境感知可帮助智能汽车更为准确地理解并感知道路环境、障碍物及交通规则,提高智能汽车对周围环境的理解与认知,实现安全、高效的智能驾驶。此外,高精地图具有精确、丰富的地理信息,可帮助交通部门优化交通设计,提高运输效率,促进城市建设与发展,可辅助物流配送平台优化路线选择,建设运输时间与成本。高精地图在智能交通、城市规划、物流配送、数字孪生系统等领域都有重要的应用价值,其潜力仍有待充分挖掘,需不断研究与探索,以扩展高精地图的应用场景。

5 结 语

高精地图作为智能交通发展的基石之一,对社会发展的各方面都有着积极影响,本文从模型

与格式、生产与更新、应用等方面对高精地图展开了探讨。目前,高精地图的发展取得了一定的成就,同时也面临着一些困难和挑战,在不断攻克技术难关的过程中,共同应对这些挑战至关重要,可推动高精地图更好地为智能交通与社会发展提供服务。

1) 现有高精地图模型多关注静态驾驶环境信息,对道路动态要素刻画不足,高度智能化的驾驶汽车需要能够感知和识别动态的交通状况、车辆和行人等障碍物信息,并做出及时准确的决策,但传统地图模型难以满足这种要求,对于智能汽车在复杂动态环境中的实时感知和决策能力有一定局限。另外,现有地图模型的复杂性导致高精地图的采集成本较高,更新效率低,地图的实时性和准确性难以得到保障,高精地图的大规模应用受到一定的限制。生成精准、全面的动

态认知地图是高级别智能驾驶汽车实现规模化应用的关键,本文提出基于心象地图建立高精地图认知模型的思路,通过全面认知道路动静态信息,实现对复杂环境的精准感知,具备自主学习和自适应性的优点,为智能驾驶系统带来更高的鲁棒性、可靠性和安全性。

2)现有高精地图的采集、生产与更新分别由不同的主体进行,导致高精地图生产效率低、成本高、更新慢,同时,这种分散的模式难以支撑智能驾驶汽车在复杂环境的自主认知与决策能力。为实现高精地图的落地应用,可基于认知模型,利用众源采集技术丰富地图数据的内容与覆盖范围,快速获取更多、更全面的地理信息;建立地图云服务平台,用于数据存储、处理与分享,集中管理并存储大规模地图数据,为多方共享与应用提供便利;采用实时更新技术,通过通信技术将数据实时反馈至地图云服务平台,实现地图的动态更新,建立高精地图的闭环架构。

3)中国现有的地图测绘政策,以及对于高精地图安全处理与审查流程,在一定程度上对产业的发展产生了影响。为推动高精地图的健康发展,一方面,应积极研究地理信息保密处理的新技术,并推动智能审图的发展,引入新的技术手段,以更好地保护地图数据的安全性;另一方面,高精地图的发展也应以保障国家信息安全为前提,须制定严格的高精地图数据安全机制,确保地图数据在采集、存储、传输和使用过程中得到充分的保护,使用加密技术、权限控制、数据溯源等手段,实现高精地图的全生命周期安全管理。

4)现有研究对高精地图的应用尚处于探索阶段,虽取得了一定的进展,但高精地图真正的应用价值尚需进一步挖掘与探索。除智能驾驶的定位、感知与规划模块,高精地图还可应用于交通违法行为分析、公安、房地产、虚拟数字世界等领域。高精地图的出现为各行各业带来了新的机遇与创新空间,同时也面临着挑战,我们应不断探索,充分发挥高精地图的作用,克服现有的成本问题、效率问题、数据安全问题,推动高精地图的创新与发展。

参 考 文 献

- [1] Guo Renzhong, Chen Yebin, Zhao Zhigang, et al. Scientific Concept and Representation Framework of Maps in the ICT Era[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(12): 1978-1987. (郭仁忠, 陈业滨, 赵志刚, 等. ICT时代地图的科学概念及表达框架[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(12): 1978-1987.)
- [2] Ying Shen, Jiang Yuewen, Gu Jiangyan, et al. High Definition Map Model for Autonomous Driving and Key Technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230227. (应申, 蒋跃文, 顾江岩, 等. 面向自动驾驶的高精地图模型及关键技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230227.)
- [3] Wang Shuman, Ying Shen, Jiang Yuewen, et al. High Definition Map Dynamic and Static Data Association Method for Intelligent Driving Scenarios[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230224. (王舒曼, 应申, 蒋跃文, 等. 智能驾驶场景中高精地图动静态数据关联方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230224.)
- [4] Liu Jingnan, Wu Hangbin, Guo Chi, et al. Progress and Consideration of High Precision Road Navigation Map[J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(2): 99-105. (刘经南, 吴杭彬, 郭迟, 等. 高精度道路导航地图的进展与思考[J]. 中国工程科学, 2018, 20(2): 99-105.)
- [5] Dong Weihua, Liu Yilong, Hei Qiaosong, et al. Research Framework of the Theories and Methods for Pan-Map Spatial Cognition[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(12): 2007-2014. (董卫华, 刘毅龙, 黑巧松, 等. 泛地图空间认知理论与方法研究框架[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(12): 2007-2014.)
- [6] Yin Zhangcai, Qi Ruyun, Ying Shen. Information Transmission Model of High Definition Map for Autonomous Driving[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230135. (尹章才, 齐如煜, 应申. 自动驾驶高精地图的信息传输模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230135.)
- [7] Koláčny A. Cartographic Information: A Fundamental Concept and Term in Modern Cartography[J]. *The Cartographic Journal*, 1969, 6(1): 47-49.
- [8] Wang Yanliang, Zhang Yujuan. The Road Model of City Navigation Electronic Map[J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2005, 28(3): 62-64. (王延亮, 张玉娟. 城市导航电子地图的道路模型[J]. 测绘与空间地理信息, 2005, 28(3): 62-64.)

- [9] Du J, Barth M J. Next-Generation Automated Vehicle Location Systems: Positioning at the Lane Level [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2008, 9(1): 48-57.
- [10] Chen A N, Ramanandan A, Farrell J A. High-Precision Lane-Level Road Map Building for Vehicle Navigation[C]//IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, Indian Wells, USA, 2010.
- [11] Guo C Z, Kidono K, Meguro J, et al. A Low-Cost Solution for Automatic Lane-Level Map Generation Using Conventional In-Car Sensors [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(8): 2355-2366.
- [12] He Yong, Lu Hao, Wang Chunxiang, et al. Generation of Precise Lane-Level Maps Based on Multi-sensors[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2015, 35(S1): 274-278. (贺勇, 路昊, 王春香, 等. 基于多传感器的车道级高精地图制作方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(S1): 274-278.)
- [13] Liu C R, Jiang K, Yang D G, et al. Design of a Multi-layer Lane-Level Map for Vehicle Route Planning[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2017, 124: 03001.
- [14] Zhang T, Arrigoni S, Garozzo M, et al. A Lane-Level Road Network Model with Global Continuity [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 71: 32-50.
- [15] Kang Y F, Magdy A. HiDaM: A Unified Data Model for High Definition (HD) Map Data[C]//The 36th International Conference on Data Engineering Workshops, Dallas, USA, 2020: 26-32.
- [16] Shimada H, Yamaguchi A, Takada H, et al. Implementation and Evaluation of Local Dynamic Map in Safety Driving Systems[J]. *Journal of Transportation Technologies*, 2015, 5(2): 102-112.
- [17] Li Keqiang. Development Status and Countermeasures of Intelligent Networked Vehicles[J]. *Robot Industry*, 2020(6): 28-35. (李志强. 智能网联汽车的发展现状与对策建议[J]. 机器人产业, 2020(6): 28-35.)
- [18] Jiang K, Yang D G, Liu C R, et al. A Flexible Multi-layer Map Model Designed for Lane-Level Route Planning in Autonomous Vehicles[J]. *Engineering*, 2019, 5(2): 305-318.
- [19] Tolman E C. Cognitive Maps in Rats and Men[J]. *Psychological Review*, 1948, 55(4): 189-208.
- [20] Geerts J P, Chersi F, Stachenfeld K L, et al. A General Model of Hippocampal and Dorsal Striatal Learning and Decision Making[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(49): 31427-31437.
- [21] Kitamura T, MacDonald C J, Tonegawa S. Entorhinal-Hippocampal Neuronal Circuits Bridge Temporally Discontiguous Events[J]. *Learning & Memory*, 2015, 22(9): 438-443.
- [22] Bush D, Barry C, Manson D, et al. Using Grid Cells for Navigation [J]. *Neuron*, 2015, 87(3): 507-520.
- [23] GDF. Geographic Data Files GDF 5.1 [EB/OL]. (2020-11-01) [2023-01-05]. <https://www.iso.org/standard/72494.html>.
- [24] Cai Zhongliang, Wang Mengqi, Li Bozhao, et al. Research on High Definition Map Related Standards and Data Models[J]. *Journal of Geomatics*, 2023, 48(1): 30-34. (蔡忠亮, 王孟琪, 李伯钊, 等. 高精地图相关标准及数据模型的研究[J]. 测绘地理信息, 2023, 48(1): 30-34.)
- [25] Zhan Jiao, Guo Chi, Lei Tingting, et al. Comparative Study on Data Standards of Autonomous Driving Map[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2021, 26(1): 36-48. (詹骄, 郭迟, 雷婷婷, 等. 自动驾驶地图的数据标准比较研究[J]. 中国图象图形学报, 2021, 26(1): 36-48.)
- [26] Navigation Data Standard. The Worldwide Standard for Map Data in Automotive Eco-Systems [EB/OL]. (2017-05-11) [2023-01-05]. <https://nds-association.org/>.
- [27] OpenDRIVE. ASAM OpenDRIVE [EB/OL]. (2020-01-14) [2023-01-05]. <https://www.asam.net/standards/detail/opendrive/>.
- [28] Bao Z, Hossain S, Lang H, et al. A Review of High Definition Map Creation Methods for Autonomous Driving[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 122: 106125.
- [29] Li Bijun, Zhang Hongjuan, Zheng Ling. Modern Surveying and Mapping Technology and Intelligent Driving[M]. Beijing: Science Press, 2021. (李必军, 张红娟, 郑玲. 现代测绘技术与智能驾驶[M]. 北京: 科学出版社, 2021.)
- [30] Su Jinglan, Zhang Hongping. Performance Analysis of RTK Algorithm for Single-Frequency Combination of GPS and BDS in Urban Environments[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(10): 1033-1037. (苏景岚, 章红平. 城市环境下 BDS/GPS 单频 RTK 定位算法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(10): 1033-1037.)
- [31] Wang Zhi, Cao Qinglei, Zhang Hongde, et al. Application and Accuracy Analysis of PPK Measurement Technology[J]. *Urban Geotechnical Investiga-*

- tion & Surveying*, 2019(2): 97-100. (王智, 曹庆磊, 张洪德, 等. PPK动态后处理测量技术及精度分析[J]. 城市勘测, 2019(2): 97-100.)
- [32] Cao Xinyun, Shen Fei, Li Jiancheng, et al. BDS-3/GNSS Uncombined Precise Point Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(1): 92-100. (曹新运, 沈飞, 李建成, 等. BDS-3/GNSS非组合精密单点定位[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 92-100.)
- [33] Yang Tao, Zhao Ziyang, Li Xingfei, et al. Tightly-coupled Integration Method for Multi-constellation GNSS/INS[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2015, 23(1): 38-42. (杨涛, 赵子阳, 李醒飞, 等. 多星座GNSS/INS紧耦合方法[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(1): 38-42.)
- [34] Zhou Zhiguo, Di Shunfan, Feng Xin. Advances in SIE 3D LiDAR SLAM Technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(3): 209-220. (周治国, 邸顺帆, 冯新. 语义信息增强的3D激光SLAM技术进展[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3): 209-220.)
- [35] Kurt-Yavuz Z, Yavuz S. A Comparison of EKF, UKF, FastSLAM2.0, and UKF-based FastSLAM Algorithms[C]// The 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems, Lisbon, Portugal, 2012.
- [36] Lin M W, Yang C J, Li D J. An Improved Transformed Unscented FastSLAM with Adaptive Genetic Resampling [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(5): 3583-3594.
- [37] Grisetti G, Stachniss C, Burgard W. Improved Techniques for Grid Mapping with Rao-Blackwellized Particle Filters [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(1): 34-46.
- [38] Zhang J, Singh S. LOAM: LiDAR Odometry and Mapping in Real-Time [C]//Robotics: Science and Systems X, Berkeley, USA, 2014.
- [39] Shan T X, Englot B. LeGO-LOAM: Lightweight and Ground-Optimized LiDAR Odometry and Mapping on Variable Terrain [C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Madrid, Spain, 2018.
- [40] Hess W, Kohler D, Rapp H, et al. Real-Time Loop Closure in 2D LiDAR SLAM [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Stockholm, Sweden, 2016.
- [41] Olson E B. Real-Time Correlative Scan Matching [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 2009.
- [42] Wu Jianqing, Song Xiuguang. Review on Development of Simultaneous Localization and Mapping Technology [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2021, 51(5): 16-31. (吴建清, 宋修广. 同步定位与建图技术发展综述[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(5): 16-31.)
- [43] Tian Ye, Chen Hongwei, Wang Fasheng, et al. Overview of SLAM Algorithms for Mobile Robots [J]. *Computer Science*, 2021, 48(9): 223-234. (田野, 陈宏巍, 王法胜, 等. 室内移动机器人的SLAM算法综述[J]. 计算机科学, 2021, 48(9): 223-234.)
- [44] Mur-Artal R, Montiel J M M, Tardós J D. ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(5): 1147-1163.
- [45] Mur-Artal R, Tardós J D. ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(5): 1255-1262.
- [46] Forster C, Pizzoli M, Scaramuzza D. SVO: Fast Semi-direct Monocular Visual Odometry [C]//2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Hong Kong, China, 2014.
- [47] Engel J, Schöps T, Cremers D. LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM [C]//The 13th European Conference, Zurich, Switzerland, 2014.
- [48] Duan C, Junginger S, Huang J, et al. Deep Learning for Visual SLAM in Transportation Robotics: A Review [J]. *Transportation Safety and Environment*, 2019, 1(3): 177-184.
- [49] Wang S, Clark R, Wen H K, et al. DeepVO: Towards End-to-End Visual Odometry with Deep Recurrent Convolutional Neural Networks [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, Singapore, 2017.
- [50] Behley J, Stachniss C. Efficient Surfel-Based SLAM Using 3D Laser Range Data in Urban Environments [C]//Robotics: Science and Systems XIV. Pittsburgh, PA, USA, 2018.
- [51] Dai Jiguang, Wang Yang, Du Yang, et al. Development and Prospect of Road Extraction Method for Optical Remote Sensing Image [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(7): 804-823. (戴激光, 王杨, 杜阳, 等. 光学遥感影像道路提取的方法综述[J]. 遥感学报, 2020, 24(7): 804-823.)
- [52] Chaudhuri D, Kushwaha N K, Samal A. Semi-automated Road Detection from High Resolution Satellite Images by Directional Morphological Enhance-

- ment and Segmentation Techniques[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(5): 1538-1544.
- [53] Hou Qiaochu, Li Bijun, Cai Yi. High-Precision Lane-Level Map Elements Extracting Based on High-Resolution Remote Sensing Image[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(3): 38-43. (侯翘楚, 李必军, 蔡毅. 高分辨率遥感影像的车道级高精地图要素提取[J]. 测绘通报, 2021(3): 38-43.)
- [54] Kahraman I, Karas I R, Akay A E. Road Extraction Techniques from Remote Sensing Images: A Review[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018, XLII-4/W9: 339-342.
- [55] Lian R B, Wang W X, Mustafa N, et al. Road Extraction Methods in High-Resolution Remote Sensing Images: A Comprehensive Review[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 5489-5507.
- [56] Yang Wei, Ai Tinghua. Road Centerline Extraction from Crowdsourcing Trajectory Data[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2016, 32(3): 1-7. (杨伟, 艾廷华. 基于众源轨迹数据的道路中心线提取[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(3): 1-7.)
- [57] Wang J, Rui X P, Song X F, et al. A Novel Approach for Generating Routable Road Maps from Vehicle GPS Traces[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015, 29(1): 69-91.
- [58] Tang L L, Yang X, Kan Z H, et al. Lane-Level Road Information Mining from Vehicle GPS Trajectories Based on Naïve Bayesian Classification[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2015, 4(4): 2660-2680.
- [59] Qiu J, Wang R S. Road Map Inference: A Segmentation and Grouping Framework[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2016, 5(8): 130.
- [60] Li B J, Guo Y, Zhou J, et al. A Data Correction Algorithm for Low-Frequency Floating Car Data[J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3639.
- [61] Li Siyu, Xiang Longgang, Zhang Caili, et al. Extraction of Urban Road Network Intersections Based on Low-Frequency Taxi Trajectory Data[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(12): 1845-1854. (李思宇, 向隆刚, 张彩丽, 等. 基于低频出租车轨迹的城市路网交叉口提取研究[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(12): 1845-1854.)
- [62] Tang Luliang, Kan Zihan, Huang Fangzhen, et al. Travel Time Detection at Intersections from Taxis' Trace Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1): 136-142. (唐炉亮, 阚子涵, 黄方贞, 等. 利用低频时空GPS轨迹进行交叉口通行时间探测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(1): 136-142.)
- [63] Deng Min, She Tingting, Huang Jincai, et al. Fine Road Network Modeling Based on Ubiquitous Location Data[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(9): 2171-2183. (邓敏, 佘婷婷, 黄金彩, 等. 基于泛在位置数据的城市道路网精细建模[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(9): 2171-2183.)
- [64] Biagioni J, Eriksson J. Map Inference in the Face of Noise and Disparity [C]//The 20th International Conference on Advances in Geographic Information Systems, Redondo Beach, California, 2012.
- [65] Guo Y, Li B J, Lu Z, et al. A Novel Method for Road Network Mining from Floating Car Data[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2022, 25(2): 197-211.
- [66] Cao J W, Song C X, Song S X, et al. Lane Detection Algorithm for Intelligent Vehicles in Complex Road Conditions and Dynamic Environments [J]. *Sensors*, 2019, 19(14): 3166.
- [67] Jiang Wuhua, Zhou Songlin, Wang Qidong, et al. Research on Curb Detection and Tracking Method Based on Adaptive Multi-feature Fusion[J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43(12): 1762-1770. (姜武华, 周松林, 王其东, 等. 基于自适应多特征融合的路沿检测与跟踪方法研究[J]. 汽车工程, 2021, 43(12): 1762-1770.)
- [68] Zhao G Q, Yuan J S. Curb Detection and Tracking Using 3D-LiDAR Scanner[C]//The 19th IEEE International Conference on Image Processing, Orlando, USA, 2012.
- [69] Xu Andi, Wang Huifeng, Yu Bingwei, et al. Road Extraction Method Based on Vehicle LiDAR Point Cloud[J]. *Optical Technique*, 2023, 49(1): 29-33. (徐安帝, 王会峰, 余炳伟, 等. 基于车载LiDAR点云的道路提取方法[J]. 光学技术, 2023, 49(1): 29-33.)
- [70] Chang Liangliang, Xu Guoliang, Li Wanlin, et al. Road Curb Detection Algorithm Based on 3D LiDAR[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2020, 32(6): 1039-1047. (常亮亮, 许国良, 李万林, 等. 基于三维激光雷达的路沿检测算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2020, 32

- (6): 1039-1047.)
- [71] Zou M, Kageyama Y. Road Curb Detection Based on a Deep Learning Framework [C]// IEEE 13th Annual Computing and Communication Workshop and Conference, Las Vegas, USA, 2023.
- [72] Sun Yang, Han Lei, Wang Chengqing, et al. Curb Segmentation Using Dual Branch and Feature Fusion Network[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2023, 59(9): 255-261. (孙扬, 韩磊, 王程庆, 等. 采用双支路与特征融合网络的路沿分割[J]. *计算机工程与应用*, 2023, 59(9): 255-261.)
- [73] Oniga F, Nedeveschi S, Meinecke M M. Curb Detection Based on Elevation Maps from Dense Stereo [C]//IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing, Cluj-Napoca, Romania, 2007.
- [74] Siegemund J, Pfeiffer D, Franke U, et al. Curb Reconstruction Using Conditional Random Fields[C]// IEEE Intelligent Vehicles Symposium, La Jolla, USA, 2010.
- [75] Cheng M M, Zhang Y G, Su Y N, et al. Curb Detection for Road and Sidewalk Detection[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(11): 10330-10342.
- [76] Wu Yiquan, Liu Li. Research and Development of the Vision-Based Lane Detection Methods[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(12): 92-109. (吴一全, 刘莉. 基于视觉的车道线检测方法研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(12): 92-109.)
- [77] Duan D G, Xie M, Mo Q, et al. An Improved Hough Transform for Line Detection[C]// International Conference on Computer Application and System Modeling, Taiyuan, China, 2010.
- [78] Deng J Y, Han Y. A Real-Time System of Lane Detection and Tracking Based on Optimized RANSAC B-spline Fitting [C]//The Research in Adaptive and Convergent Systems, Montreal, Quebec, Canada, 2013.
- [79] Li Q Q, Zhou J, Li B J, et al. Robust Lane-Detection Method for Low-Speed Environments[J]. *Sensors*, 2018, 18(12): 4274.
- [80] Li J Y, Jiang F L, Yang J, et al. Lane-DeepLab: Lane Semantic Segmentation in Automatic Driving Scenarios for High Definition Maps[J]. *Neurocomputing*, 2021, 465: 15-25.
- [81] Al Mamun A, Em P P, Hossen J. Lane Marking Detection Using Simple Encode Decode Deep Learning Technique: SegNet [J]. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2021, 11(4): 3032.
- [82] Lee D H, Liu J L. End-to-End Deep Learning of Lane Detection and Path Prediction for Real-Time Autonomous Driving[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2023, 17(1): 199-205.
- [83] Kang Xueliang, Wang Xiaochuan. Road Marking Extraction from Point Cloud Based on Vehicular LiDAR[J]. *Radio Engineering*, 2023, 53(5): 1228-1234. (康学亮, 王晓川. 基于车载激光雷达的点云道路标线提取方法[J]. *无线电工程*, 2023, 53(5): 1228-1234.)
- [84] Mi Xiaoxin, Yang Bisheng, Dong Zhen. Fast Visibility Analysis and Application in Road Environment with Mobile Laser Scanning Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(2): 258-264. (米晓新, 杨必胜, 董震. 车载激光点云道路场景可视域快速计算与应用[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(2): 258-264.)
- [85] Mi X X, Yang B S, Dong Z, et al. A Two-Stage Approach for Road Marking Extraction and Modeling Using MLS Point Clouds [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 180: 255-268.
- [86] Huang Gang, Liu Xianlin. Automatic Extraction and Classification of Road Markings Based on Deep Learning [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0804002. (黄刚, 刘先林. 基于深度学习的道路标线自动提取与分类方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0804002.)
- [87] Luo Z P, Gao L P, Xiang H D, et al. Road Object Detection for HD Map: Full-Element Survey, Analysis and Perspectives [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 197: 122-144.
- [88] Wang Peng, Liu Rufe, Ma Xinjiang, et al. An Automatic Extraction Method for Pole-Like Objects from Vehicle-Borne Laser Point Cloud [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(7): 1035-1042. (王鹏, 刘如飞, 马新江, 等. 一种车载激光点云中杆目标自动提取方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(7): 1035-1042.)
- [89] Yang Zhou, Kang Zhizhong, Yang Juntao, et al. Research on Morphological Analysis and Classification of Pole-Like Objects from Mobile LiDAR Point Clouds [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45(1): 69-76. (杨洲, 康志忠, 杨俊涛, 等. 车载点云中杆状地物的形态分析与分类研究[J]. *测绘科学*, 2020, 45(1): 69-76.)
- [90] Tu J M, Yao J, Li L, et al. Extraction of Street

- Pole-Like Objects Based on Plane Filtering from Mobile LiDAR Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59 (1) : 749-768.
- [91] Cao X F, Yang P, Lyu F, et al. Trajectory Penetration Characterization for Efficient Vehicle Selection in HD Map Crowdsourcing [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(6): 4526-4539.
- [92] Zhou J, Guo Y, Bian Y A, et al. Lane Information Extraction for High Definition Maps Using Crowdsourced Data [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(7): 7780-7790.
- [93] Zhang P, Zhang M M, Liu J N. Real-Time HD Map Change Detection for Crowdsourcing Update Based on Mid-to-High-End Sensors [J]. *Sensors*, 2021, 21(7): 2477.
- [94] Kim K, Cho S, Chung W. HD Map Update for Autonomous Driving with Crowdsourced Data [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6 (2): 1895-1901.
- [95] Pannen D, Liebner M, Hempel W, et al. How to Keep HD Maps for Automated Driving up to Date [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Paris, France, 2020.
- [96] Qin Zhiai, Li Yuke, Liu Yu. Discussion on Compliance of Crowdsourcing Update of High Precision Maps [J]. *Automobile & Parts*, 2020(16): 62-64. [101] (秦志媛, 黎宇科, 刘宇. 高精度地图众包更新合规问题初探[J]. *汽车与配件*, 2020(16): 62-64.)
- [97] Liu Wanzeng, Chen Jun, Ren Jiabin, et al. Hybrid Intelligence-Based Framework for Automatic Map Inspecting Technology [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(12): 2038-2046. (刘万增, 陈军, 任加新, 等. 基于混合智能的地图自动审核技术框架[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(12): 2038-2046.)
- [98] Chalvatzaras A, Pratikakis I, Amanatiadis A A. A Survey on Map-Based Localization Techniques for Autonomous Vehicles [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(2): 1574-1596.
- [99] Ghallabi F, El-Haj-Shade G, Mittet M A, et al. LiDAR-Based Road Signs Detection for Vehicle Localization in an HD Map [C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Paris, France, 2019.
- [100] Xiao Z Y, Yang D G, Wen T P, et al. Monocular Localization with Vector HD Map (MLVHM): A Low-Cost Method for Commercial IVs [J]. *Sensors*, 2020, 20(7): 1870.
- [101] Jian Z Q, Zhang S Y, Chen S T, et al. High Definition Map Combined Local Motion Planning and Obstacle Avoidance for Autonomous Driving [C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Paris, France, 2019.
- [102] Guo X M, Cao Y X, Zhou J, et al. HDM-RRT: A Fast HD-Map-Guided Motion Planning Algorithm for Autonomous Driving in the Campus Environment [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(2): 487.
- [103] Wang H M, Zhang L L, Kong Q, et al. Motion Planning in Complex Urban Environments: An Industrial Application on Autonomous Last-Mile Delivery Vehicles [J]. *Journal of Field Robotics*, 2022, 39(8): 1258-1285.
- [104] Yang B, Liang M, Urtasun R. Hdnet: Exploiting HD Maps for 3D Object Detection [C]//Conference on Robot Learning, Zürich, Swiss, 2018.
- [105] Fang J, Zhou D F, Song X B, et al. MapFusion: A General Framework for 3D Object Detection with HDMaps [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Prague, 2021.
- [106] Huang Y X, Zhou J, Li X C, et al. MENet: Map-Enhanced 3D Object Detection in Bird's-Eye View for LiDAR Point Clouds [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 120: 103337.