



引文格式:齐如煜,尹章才,顾江岩,等.高精地图的知识图谱表达[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(4):651-661.DOI:10.13203/j.whugis20230308

Citation: QI Ruyü, YIN Zhangcai, GU Jiangyan, et al. Knowledge Graph Expression of High Definition Map[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(4):651-661. DOI:10.13203/j.whugis20230308

高精地图的知识图谱表达

齐如煜¹ 尹章才¹ 顾江岩² 陈毅然¹ 应申²

¹ 武汉理工大学资源与环境工程学院,湖北 武汉,430070

² 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

摘要:高精地图是自动驾驶的“传感器”,为自动驾驶提供必要的先验数据以及相应的超视距感知、校验定位、动态规划和决策控制。然而,高精地图数据供给与自动驾驶知识需求仍存在鸿沟,包括数据量大导致查询困难、数据关联弱导致语义理解和智能决策困难。知识图谱是将知识以图的结构表达出来,以描述实体及其关系,涉及实体抽取和关系抽取。为此,在高精地图数据基础上,引入知识图谱,提出高精地图知识图谱的构建方法,以架起地图数据供给与驾驶知识需求之间的桥梁,支撑高精地图数据到自动驾驶知识的转化。构建的知识图谱实例,一方面将高精地图海量数据采用图进行了二次表达,建立了类似于索引的结构;另一方面显式表达了面向自动驾驶需求的语义关系。实验结果表明,知识图谱能为高精地图的语义查询、知识推理和局部决策规划提供基础。所提出的方法能实现高精地图先验数据的语义结构化,推进高精地图由数据到信息到知识的跨越,为自动驾驶的落地贡献先验知识。

关键词:高精地图;知识图谱;语义化;自动驾驶

中图分类号:P208

文献标识码:A

收稿日期:2023-08-23

DOI:10.13203/j.whugis20230308

文章编号:1671-8860(2024)04-0651-11

Knowledge Graph Expression of High Definition Map

QI Ruyü¹ YIN Zhangcai¹ GU Jiangyan² CHEN Yiran¹ YING Shen²

¹ School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

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

Abstract: Objectives: High definition map (HDM) is the “sensor” for automated driving (AD), which integrates the real-time data collected by various sensors and the prior data collected in the early stage, and serves the application of AD, including providing the necessary prior data and the corresponding over-the-horizon perception, calibration positioning, dynamic planning and decision-making and control. However, there still exists a gap between the supply of HDM data and the demand for AD knowledge, including difficulties in data retrieval due to the large volume of data and challenges in semantic understanding and intelligent decision-making due to weak data correlation. Therefore, how to balance the data supply of HDM and the knowledge demand of AD is the main goal of this paper. **Methods:** Knowledge graph (KG) is a representation of knowledge in a graph structure to describe entities and their relationships, involving entity extraction and relationship extraction, so that it can make the AD with interpretable, understandable and inferential. This means that KG can serve as an alternative and explicit simulation of the human mind and map cognition that driverless vehicles are missing. Therefore, we introduce KG on the basis of HDM data, and propose a framework of HDM-KG-driving task, so as to support the transformation of HDM data to AD knowledge. The construction of HDM-KG adopts the top-down method, that is, the pattern layer is first followed by the data layer. As the conceptual hierarchy of KG, pattern layer defines the concept, attribute and relation of map ontology, and it can explicitly describe the indirect information and implicit correla-

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2501100, 2021YFB2501101)。

第一作者:齐如煜,硕士,研究方向为自动驾驶与时间地理学。qiruyv@163.com

通讯作者:尹章才,教授。yinzhangcai@whut.edu.cn

tion information of map domain from the perspective of traffic. The data layer is an instantiation of the pattern layer, a way to populate the pattern layer through instance matching. **Results:** To verify the validity of the proposed method, a virtual simulation dataset based on OpenStreetMap data is constructed and converted into two formats. The first is the OpenDRIVE format, which is used to build the KG of static data, including the static knowledge of roads, lanes, intersections, road signs and road markings. The other is the data format of CARLA AD-simulator, which is used for AD simulation and the construction of dynamic real-time KG, including the dynamic knowledge of self-driving cars and vehicles in front of them, pedestrians and other traffic participants. Through the application of the resulting HDM-KG in semantic query, knowledge reasoning and local decision planning, the results show that the HDM-KG explicitly expresses the semantic relationship, enhances the application of HDM in AD, and can further improve AD by connecting additional knowledge such as safety requirements, traffic rules or scene background. **Conclusions:** HDM-KG can structurally and explicitly express the traffic semantics contained in map objects and the semantic relations between objects, traffic rule constraints, traffic scenes and other knowledge, and realize the three-layer evolution of data-information-knowledge of data sources-HDM-KG, providing support for semantic relation query, logical reasoning and motion planning required by driving tasks. In addition, the introduction of KG eliminates the need for driving tasks to perceive and predict objects and semantic relationships from data collected by sensors, which are explicitly defined by HDM-KG, reducing computational latency and improving safety and reliability. The top-down method of constructing KG will cost more labor and time, and the subsequent research will carry out the bottom-up method to automatically fill the KG with multi-source data.

Key words: high definition map; knowledge graph; semanticization; automated driving

高精地图是普通导航地图的颠覆性升级,如制作和使用同步实时,其主体是机器而不是人类,不只是服务于导航,还包括导航决策本身,是驾驶环境的数字孪生体,具有高精度、高丰富度、高动态性等特点^[1],在自动驾驶中扮演着不可或缺的指挥员角色^[2]。然而,高精地图也存在数据量大、数据关联弱、间接信息隐含等问题^[3-4]。首先,精度高带来庞大的数据量^[5],增加了数据查询的难度。其次,作为地图,关注地图要素的直接信息,包括位置、形状和属性,忽略了隐含的关联信息(如自行车与交通要素之间的语义关系和交互关系)和间接信息(如交通要素的行为特征以及对车辆的限制内容)^[3],从而不便于语义化查询和交通场景的知识理解及决策控制。

为了解决上述问题,人们尝试采用图结构表达高精地图,其中图的节点和边分别表示地图要素及其相互关系。文献[6]提出了基于关系的局部动态地图模型,通过图数据库组织和存储静态数据(如道路数据)和动态数据(如车辆、行人)^[7],提高了路网数据的存储、管理和查询效率^[8-9]。进一步,文献[10]提出了可互操作的基于图的局部动态地图,为自动驾驶的感知数据、V2X标准信息以及地图服务等多源异构数据的交互提供了统一平台,提高了高精地图数据在图数据库中的

插入、查询效率和互操作性^[11-12]。图的网状结构增强了地图要素之间联系的表达,提高了数据查询效率。

然而,到目前为止,高精地图的图结构仍停留在直接信息表达上。事实上,自动驾驶对地图信息的需求还包括隐式的关联信息和间接信息^[13],它们是高精地图针对自动驾驶应用的扩展和增量。本文将通过两个重要的改进进行扩展。首先,研究高精地图隐含信息的显式表达。隐含信息一方面隐匿在高精地图的要素及其属性之中,如交通地图要素隐含的行为特征(左转标志的转向类型需要打左转向灯);另一方面隐匿在 本体关系中,包括车道左右的空间拓扑关系、它在自行车前方的方向关系、超车前后的时间关系、限速标志与其作用的道路区域的语义关系等。本文首先研究了高精地图隐含信息的抽取和基于图结构的显式表达,其次将图结构扩展至知识图谱,实现高精地图由数据到信息到知识的转化。这样,高精地图的知识图谱不仅继承了图结构的类索引机制,也扩展了隐含信息的知识增量,架起地图数据供给与驾驶知识需求之间的桥梁,以满足自动驾驶对高精地图的语义化查询和知识理解的需求。

1 相关研究

自动驾驶是一种基于人工智能的类人驾驶,同样需要环境感知和规划决策控制。环境感知对应于人类视觉识别,是自动驾驶的前提,其结果为高精地图;规划决策控制对应于人类逻辑思维,其结果为来源于人类驾驶经验^[14]和规则的知识增量。它们是服务于自动驾驶的两个不可分割的部分。

1.1 高精地图

表达驾驶场景内容的高精地图在自动驾驶需求的拉动下于 2014 年前后产生^[15],重拾了标准导航地图因人类自身的视觉识别能力和逻辑思维能力而精简的道路信息^[5],提供全天候超视距感知、校验定位、动态规划和决策控制,为自动驾驶全过程运行管控和安全保障提供依据^[16]。高精地图的逻辑模型和数据标准直接决定了制作内容,包括选择哪些地图要素及其属性,对高精地图的规模化发展与应用具有重要意义^[15]。

目前,高精地图的数据标准尚未统一^[17]。国际上以欧洲为主导,如导航数据标准(navigation data standard, NDS)与 OpenDRIVE,它们引领着高精地图技术的发展和在仿真、导航、自动驾驶等领域的广泛应用^[15]。NDS 为高精地图定义了数据模型和存储格式,面向会员使用;OpenDRIVE 为静态道路网定义了开放标准,但未涉及标准导航地图方面的内容,如兴趣点,并不能完全满足自动驾驶所需的更多信息^[18]。在本文的本文定义中,道路及其相关交通设施(如交通信号灯、路灯)参照 OpenDRIVE 与地理数据文件(geographic data file, GDF),道路标志与标线参照国标《道路交通标志与标线》。其中,GDF 是用于标准导航领域中地理数据交换的纯文本格式。

高精地图的逻辑模型由多层数据组合而成,目前的图层划分也尚未统一^[19]。例如,博世从时态角度提出了局部动态地图模型^[20],包括静态、半静态、半动态和动态 4 个数据层。在此基础上,高精地图四层逻辑模型^[14]将用户个性化信息独立出来,包括静态地图层、实时数据层、动态数据层和用户模型层。清华七层模型^[21]则从多粒度角度进一步细分,包括道路级导航层(道路级路网层、宏观动态层),车道级导航层(中间层、车道级细节层),自动驾驶辅助层(虚拟传感器层、动态障碍物层、驾驶员层)。图层的划分差异不影响各模型的地图要素内容的一致性,本文选取四

层逻辑模型^[14]。

尽管高精地图的逻辑模型和数据标准均未统一,但它们为本体的规范化描述提供了参考。然而,作为一种数据库,高精地图的数据组织倾向于快速且便于存储,忽略了地图要素间接信息的显式表达和其他交通属性的全面表达以及地图要素之间相互联系的清晰描述,因此有必要将抽象复杂的各类上述信息直观表达^[3],以便于交通场景的语义查询和知识理解,实现地图的数据库到知识库的迁移。

1.2 知识图谱

知识图谱由谷歌公司 2012 年提出,其初衷是“让搜索通往答案本身”。它是人工智能的分支,是语义网络^[22]、本体论^[23]、语义网^[24]、链接数据^[25]等技术和理论相互补充和融合的结果,使计算机具有可解释、可理解、可推理的智能。作为结构化的语义知识库,知识图谱最常采用点-边-点的三元组模型,其节点和边显式描述实体及其语义关系。近年来,知识图谱逐渐走进地学领域,出现了大规模、时空动态的地理知识图谱^[26-27],推动传统地理信息服务到地理知识服务的转变。

知识图谱的构建主要有两种相向的认知路径:自顶向下和自底向上。自顶向下方法先从领域最一般概念入手,逐级派生细化模式层中的概念和关系,再将实例匹配填充到模式层并生成数据层,适用于具备领域知识体系的情形,高精地图的模型和标准提供了基础知识库就属于此类。自底向上方法则先从多源数据中提取出实体并通过知识融合后加入数据层,再通过知识加工逐级归纳形成模式层中的概念和关系,适用于具备众包数据的情形。上述两种方法相互协同,可以混合构建全局的系统性知识图谱^[28]。

1.3 自动驾驶知识图谱

当前,自动驾驶任务如感知、轨迹预测和运动规划等,通常利用基于自动驾驶数据集驱动下的深度学习技术^[29]。这样的数据集来源于各类车载传感器,如照相机、激光雷达,然而它们往往不能表示场景中实体之间的空间、时间、功能和语义关系。这种知识的缺乏导致对驾驶场景中固有的复杂性和动态性的肤浅理解^[29]。另外,深度学习难以独立支撑安全验证。

知识图谱能显式表达语义关系和融入安全验证等额外的知识,其与深度学习的结合具有广泛前景^[29]。在对象感知与预测方面,知识图谱提供的关联信息能用于根据一个对象预测场景中

缺失的另一对象,如根据自行车预测骑/推车人^[29]。在场景理解方面,通过整合多源数据可以实现对驾驶场景的整体视图和深度理解^[29-31]。在行为预测方面,知识图谱被应用于识别和描述车辆轨迹数据中的交通事件及其前因后果,以预测车辆的移动行为^[2]。在运动规划方面,根据从现实生活中收集的边角案例数据生成知识图谱,能便于人们更好地了解驾驶风险空间和丰富高精地图的导航规则^[2]。深度学习建立了数据集与驾驶任务之间端到端的联系,知识图谱的融合则增强了这一联系。

上述知识图谱很大程度上依赖于标注训练数据的可用性,包括车载传感器收集的特定数据集和相应的用于生成领域本体的对象注释,且大多只涉及驾驶场景的特定方面和元素,如车辆、路线等^[29]。本文提出高精地图知识图谱框架,使得数据集通过高精地图媒介生成知识图谱。一方面,高精地图中的先验对象减少了要素感知、语义分割等驾驶任务和相应的数据训练。另一方面,通用的高精地图数据模型为知识图谱的标准化和通用性提供了基础,避免了不同标注模式(如标注的结构差异、标注含义或解释的异质性)带来潜在的分歧。此外,高精地图的全要素和完备性会传递给结果知识图谱。高精地图与知识图谱具有类似的图结构,方便了高精地图到知识图谱的构建。

2 高精地图知识图谱的构建

高精地图知识图谱的构建旨在采用知识图

谱对高精地图进行二次表达,实现地理物理世界的地图数据库到自动驾驶世界的驾驶知识库的抽象和发展,从而能作为驾驶机器人因代替人类驾驶员而缺失人类思维和地图认知的一种替代和显性模拟。

2.1 总体框架

高精地图是地理物理世界最高精度的表达,侧重于空间几何描述,而驾驶场景侧重于可通达性的描述。两者是同一地理空间的两个方面,通常情况下并不总相同。交通视角下的直接信息可能是地图的间接信息,如交通场景的禁止变道路段区域通过地图上的禁止变道和其解除的两个标志点表达;交通视角下关联关系连接的两个地理要素不总是地图要素,如地图中左转标志与车辆中左转灯的打开关系。因此,差异化的高精地图和交通场景需要在两者之间建立知识图谱的桥梁,便于将高精而量大的地图数据进一步转化为智能而量小的驾驶知识,也简化了高精地图的复杂性和便于自动驾驶对驾驶场景的理解。

在概念上,高精地图知识图谱是基于高精地图的知识表达,涉及两个部分:地图和知识。图1中,左侧描述了高精地图数据,右侧为图谱化知识。本文中,知识的来源覆盖高精地图和以高精地图为载体的交通场景、交通规则和边角案例等。与要素包括类和实例一样,知识图谱也包括模式概念层和数据实例层,分别对应于图1的上层和下层。模式层根据不同的交通场景构建地图要素类之间的交通语义关系,这种关系也是类。数据层是模式层的实例化,其节点和边分别是模式层中要素类的实例和语义关系类。

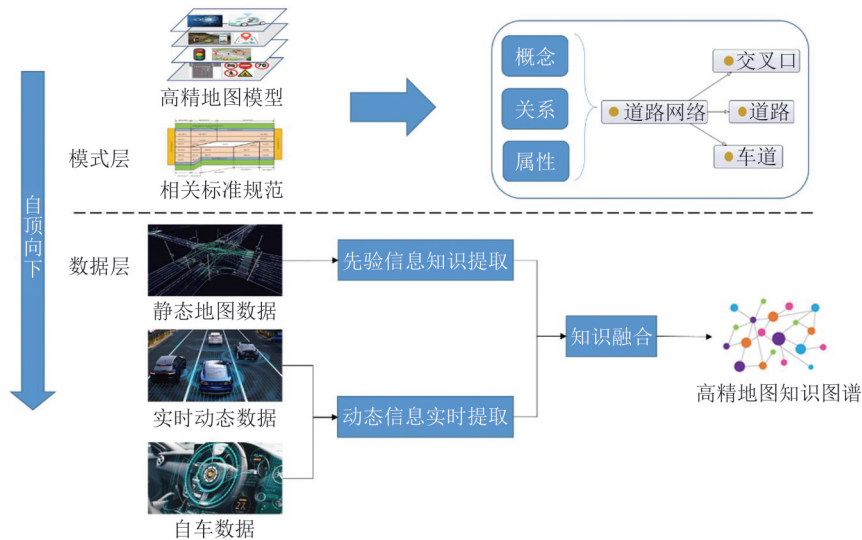


图1 高精地图知识图谱构建框架

Fig. 1 Framework for Building Knowledge Graph of High Definition Map

本文提出的高精地图知识图谱本质上是在高精地图数据与驾驶场景应用之间新增一个知识图谱的中间层,建立地图数据-图谱知识-驾驶智慧的逐级抽象框架。值得一提的是,知识图谱的构建是一个开放和不断更新、演进的过程,遵循这一原则,本文聚焦于高精地图知识图谱的构建方法。采用自顶向下的方法构建高精地图的垂直知识图谱,首先根据高精地图四层逻辑模型和通用标准规范定义高精地图的模式层,然后将高精地图数据中的实例加入数据层的知识库。之所以选择自顶向下方法,是因为高精地图不断涌现的数据模型、标准规范等提供了丰富的、具有完备性和系统性的概念、属性和关系,为知识图谱构建包括顶层及逐层派生的各粒度类在内的本体提供了领域依据,也有助于知识图谱扩大适用范围。

2.2 模式层建模

高精地图的本体面向自动驾驶领域,对高精地图的地理要素和交通领域内的术语及概念进行认知建模和标准化,以定义高精地图知识图谱的模式。模式层作为知识图谱的概念层次结构,定义了地图要素本体的概念、属性和关系,以指导知识图谱数据层的构建。

2.2.1 本体概念与属性

高精地图的本体是高精地图领域的概念的集合,也是高精地图知识图谱的骨架。概念是特性相同的一类实体的抽象,可分为静态、实时、动态和自车等 4 个层次结构^[14](见图 2)。考虑到概念类别的广泛适用性和避免完全从零开始构建本体,除自车数据层的本体自定义外,其他数据层本体重用 GDF 5.1、OpenDRIVE、《道路标志与标线》等标准的概念。标准化的本体还便于跨数据集的集成和互操作^[29]。

1) 静态地图层具有长周期更新特性,内容包括路网信息(道路网和车道网)、交通设施(交通标记)、交通统计信息和路段交通规则^[2]。静态层的先验性能弥补传感器感知边界和使用条件受限以及先验信息缺失的劣势^[16],支撑自动驾驶超视距感知、辅助定位(地理围栏^[2])、全局规划。

2) 实时数据层主要来自于路端或车联网中其他传感器通过云端实时发送的交通场景和安全移动信息^[2],包括交通事故、施工区域、天气状况等交通限制信息和道路拥堵信息等。这些语义信息有助于车辆进行全局性合理规划和安全风险评估。

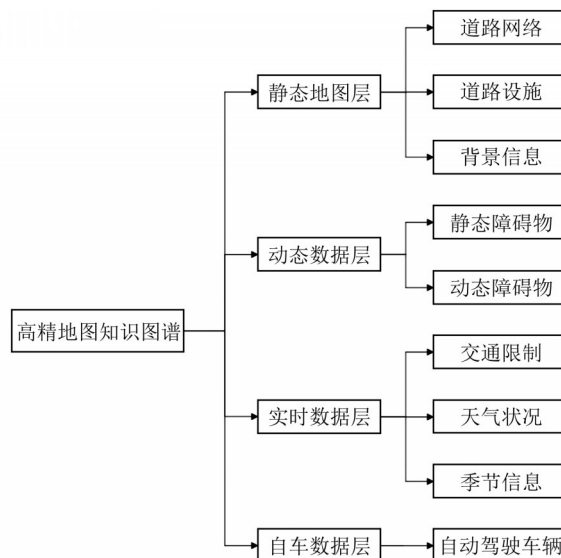


图 2 高精地图知识图谱模式层本体概念分类

Fig. 2 Classification of Ontology Concepts in Schema Layer of Knowledge Graph of High Definition Map

3) 动态数据层主要来自于自车传感器主动或被动感知的观察信号,以生成驾驶场景三维模型和提取地物语义,如行人和其他车辆^[2]。本文将动态数据进一步划分为静态和动态障碍物,前者指的是自动驾驶过程中静止不动的要素,如未被识别或者标记的坑洼或者突出物;后者指的是其他车辆、行人和动物,以及一些未定义的动态要素。

4) 自车数据层指与车辆本身相关的数据。自车位置是交通场景的局部坐标原点。相应的局部坐标系表达动态要素的相对位置以及与自车的空间关系,如拓扑、方向、度量关系。

属性是高精地图的概念所拥有的特性,包括空间位置、形状、材质、行为能力等。行为能力是高精地图相较于标准导航地图的增量,是由交通标记和交通规则生成的导航指令(如加速)的实践。例如,黄实线禁止跨越,限速标志限制车辆速度^[3]。

上述图层之间不是孤立的,而是交互融合共同服务于自动驾驶^[32]。例如,在动态图层的构建中,静态图层能改善动态识别的效率和正确率^[33]以及支持交叉验证和提供机器学习的标记信息,自车置身于动态图层的中心^[2]。又如,动态规划、决策优化、安全控制等功能的实现都需要各图层数据的协同。图层之间的联系和交互^[34]能通过本体关系进行描述。

2.2.2 本体关系

本体关系描述交通场景中实体之间的空间、

时间和语义关系。

1)空间关系包括拓扑关系、方位关系和度量关系。拓扑关系可描述“车道-路口”“车道-车道”“车道-路口-车道”“车道连接点-路口”等邻接关系、交通设施与道路附属物的位置依赖关系、车辆在道路上的行驶关系^[3]。方位关系可描述动态图层中的车辆、行人等交通参与者相对于自驾车方向的关系,如前、后、左、右。度量关系可描述自车与红绿灯等要素的距离,以提示自车适时启动信号灯状态检测,提高动态感知的效率。

2)时间包括时间点和时间段,也存在类似的空间关系,包括时间点-时间线的几何拓扑关系。例如,车辆在路口的通行时间段是否在绿灯期间内。

3)语义关系主要是刻画要素之间的交通联系,以表达可通达性或限行性,受时间、空间的约束。在时间上,私家车在早晚高峰期在公交车道上限行,货车在白天在城区限行。在空间上,车辆与道路之间的驾驶关系,与停车位的停车关系,与交通线的限行关系,与限高路段的限行关系,与隧道的打开大灯关系。在时空上,主要是速度矢量,包括方向和大小,车辆与路口或信号牌的限速关系^[3]。功能关系是语义关系的一种,本文不区分两者。

上述关系在应用中密切联系。例如,红绿灯的检测启动不仅涉及度量关系还包括方位关系,大灯的开启不仅与隧道有关,还与当前位置与隧道进口的距离有关。本体关系的两个对象既可以位于同一图层内,也可以跨图层。例如,在交通场景中,自车数据层的无人驾驶车与动态数据层的交通对象(如行人、自行车、车辆)之间社会化的安全交互关系^[2]。此外,本体关系也可以具有属性。

2.3 数据层构建

数据层是模式层的实例化,具体指在遵循模式层定义的约束和规范下建立高精地图数据中的要素实例与模式层中的本体类型之间的映射。具体构建方法包括:首先,将数据层中要素实例及其属性根据本体及其属性进行格式与语义转换,以生成知识图谱的节点;然后,规范化的要素实例自动继承模式层中要素本体类型之间的关系,以生成知识图谱的边(见图3)。

2.3.1 静态数据知识图谱构建

高精地图静态数据更新周期长,具有先验性^[2],其知识图谱可以预先生成,以减轻实时计算

压力。静态地图知识图谱包含静态地图的要素和关系,提供了地图的基本信息和结构。

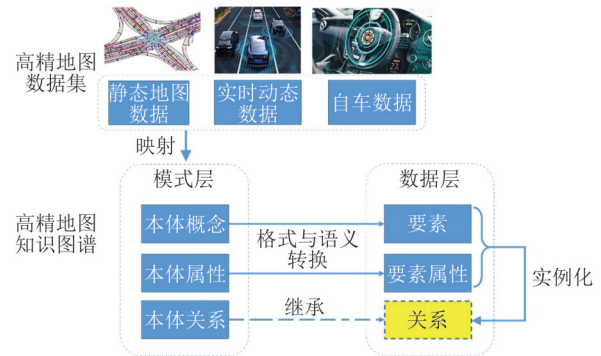


图3 高精地图知识图谱数据层构建

Fig. 3 Construction of Data Layer in Knowledge Graph of High Definition Map

1)道路网方面。道路网作为整个地图的骨架,无论是更加详细的车道数据还是道路中的相关设施,都是在道路网中进行扩充,因而其知识图谱需要优先构建。在GIS中,道路网是一种网络结构,由路口和路段构成的道路网要素实例映射到知识图谱的节点,而图谱的边则表示节点之间的关系,常见的有拓扑关系,如路口与路段的连接关系。

2)车道网方面。车道作为路网中的最小单元之一,由面状区域构成。在知识图谱中,车道作为节点,车道之间的关联和车道与道路的关联作为边。

3)道路相关信息方面。道路相关信息包括道路标志、标线、路灯等交通设施。在知识图谱中,节点表示这些信息,边表示其空间位置或作用区域与道路网络的关联。

值得一提的是,尽管静态数据的信息更新较慢,但在实际应用中静态地图数据仍需定期维护和更新,以确保高精地图及其知识图谱的准确性和现势性。

2.3.2 动态实时数据知识图谱构建

相对于静态地图数据,高精地图动态、实时数据变化快,更新频率高,其采集和知识图谱的构建亦具有实时性。实时动态数据来源广泛,包括车辆传感器(如车载摄像头、激光雷达等)和车联网平台(如V2X实时通信)^[35]。知识图谱的构建能为多源异构的实时动态数据的集成与整合提供统一的结构。

实时动态知识图谱由车辆以及相关动态要素构成,它记录了车辆与实时动态要素之间的关联和交互信息。例如,在行驶过程中,自车的不同

同行为会与高精地图中不同交通要素产生关联关系,而不同的交通要素也会为自车行为的变更提供信息支撑^[3]。车辆周围动态信息,如车辆、行人、交通事故等交通要素,作为知识图谱的一类节点,另一类节点是自车本身。两类节点之间的边表达实时动态要素与自车的关系,从而形成高精地图的实时动态知识图谱,实现多源异构、多元多样的实时动态要素的关联与统一。这种图谱会随车辆行驶过程和驾驶行为变更过程而实时动态变化。局部交通场景的重构与还原,还需要将相对定位的实时动态知识图谱与静态知识图谱进行映射和融合。

2.3.3 高精地图知识图谱的融合

根据上面已经构建的静态知识图谱和实时动态图谱,借助地图映射,将实时动态图谱与静态图谱进行匹配,并通过新增表示语义关系的边形成高精地图完整的知识图谱(见图4)。图谱匹

配的基本思路是将实时动态图谱中表示自车车道的节点与静态知识图谱中表示车道位置的节点进行关联,其中自车车道信息是局部坐标原点,而车道位置是全局定位。通过融合,自车车道获得全局定位,从而实现自车及以自车为原点的局部场景中的实时动态交通要素获得绝对定位,为自车所在局部场景的数字孪生提供所需的动静结合的全要素,也为车辆更准确地理解和把控驾驶环境提供支撑。

值得一提的是,分布在静态图谱和动态图谱中的车道节点语义不同,如静态图谱中称为“车道1”而在动态图谱中称为“驾驶车道”,它们的融合具有两个不同的策略:(1)将两个车道节点叠置为一个节点,从而会出现一个节点的消失和相应与该节点连接的边需要重构;(2)两个车道节点通过语义关系“概念相等”进行关联,并通过新增一条边进行连接。本文采用策略(1)。

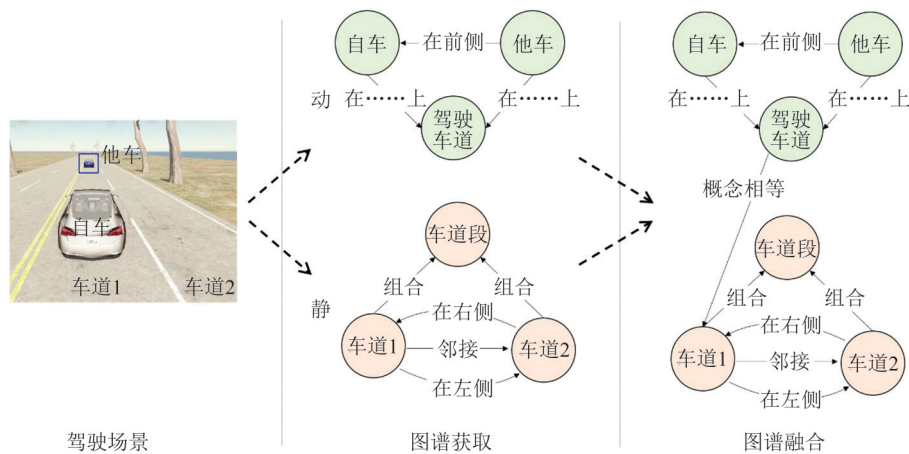


图4 高精地图知识图谱融合

Fig. 4 Knowledge Fusion in Knowledge Graph of High Definition Map

3 实例分析

3.1 方法

为了便于图示,本文提出的高精地图知识图谱构建方法已应用于虚拟仿真数据。该仿真数据来源于RoadRunner软件基于开放街道地图数据(OpenStreetMap)构建的道路、道路标志和道路标线。其中,开源地理信息平台 OpenStreet-Map 数据包括山东省济宁市部分城区的路网,全长 16 km。进一步地,将构建的仿真数据转换为两个格式:(1)OpenDRIVE 格式,用于构建静态数据知识图谱;(2)自动驾驶模拟器 CARLA 的数据格式,用于自动驾驶仿真模拟和构建动态实时知识图谱。

在仿真数据的基础上利用数据层建模方法生成高精地图图谱化的知识库。其中,静态知识图谱表达了道路、车道、路口、道路标志和道路标线等静态信息知识,涉及 OpenDRIVE 数据与知识图谱模式层中的本体的映射与转换;动态实时知识图谱表达了 CARLA 中模拟的自车与前方车辆、行人及其他交通参与者等动态知识,依赖于摄像头对场景信息的捕获和识别。最后,通过静态与动态知识图谱基于车道节点的共现关联融合知识图谱。

构建的知识图谱应用于语义查询、知识推理和局部决策规划。在查询方面,将静态知识图谱存储在 Neo4j 中,使用 Cypher 查询语言(Cypher Query Language, CQL)根据要素的名称、属性等

信息进行语义查询,结果以图形方式呈现。在知识推理方面,将静态知识图谱转化为资源描述框架格式,并使用 Datalog 逻辑推理语言实现知识推理。在局部决策规划方面,利用知识图谱提供的场景信息依据碰撞性检测(time to collision, TTC)原理^[36]判断碰撞风险,并对评估结果通过知识推理进行响应,以辅助驾驶决策。

3.2 结果

图5图示了静态知识图谱,包含1137个节点和1950个边,它基于 Neo4j 软件进行存储和可视化。图例展示了节点的类型,包括路口、道路(元素)、车道(段/线)、停止线、人行横道等;边的类型包括组合、邻接、在左侧、在右侧等。动态知识图谱包括作为节点的自车与他车,作为边的前后关联信息。值得一提的是,由于动态知识图谱随着动态场景信息的快速变化而实时动态变化,因此未将动态图谱通过 Neo4j 进行存储和可视化,相应地,由动态图谱与静态图谱相融合的结果图谱亦如此。同一知识图谱利用各种图遍历技术进行动态的组合和转换,还可以提供不同的知识视图^[29]。

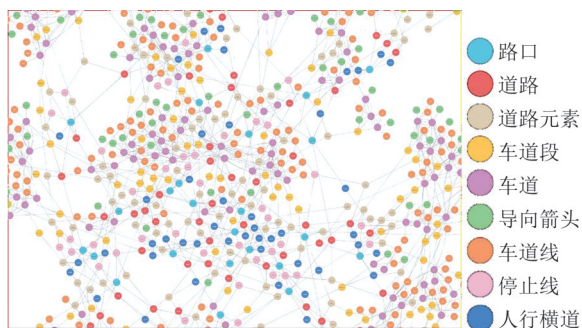


图5 高精地图静态知识图谱

Fig. 5 Static Knowledge Graph of High Definition Map

图6展示了高精地图知识图谱的查询应用。该示例在图5展示的静态高精地图知识图谱数据库中查询了车道1的左右关联要素。由图6可知,车道1的左关联要素是双实线,右关联要素为白色虚线和车道2。该查询结果表明自车位于超车道,不能向左变道但能向右变道。

图7展示了知识图谱推理新的实体间关系。图3中包括3个节点,表示同一道路中同一行驶方向的3个车道,来源于图5展示的静态高精地图知识图谱数据库。知识图谱表达了车道1和车道2之间、车道2和车道3之间均有的左右关联关系,但缺失车道1和车道3之间的间接关系。不完备的知识图谱不利于辅助决策在这样的驾驶场景中:位于车道3的车辆向左变道到车道2时

需要观察车道1的车辆。一种知识图谱的补全方法是采用 Datalog 语句“ $\text{leftLaneofleftLane}(X, Z) \leftarrow \text{relationship}(X, \text{'isleftof'}, Y) \ \& \ \text{relationship}(Y, \text{'isleftof'}, Z)$ ”,它能推理出缺失的关系:车道1是车道3的非直接左关联关系。

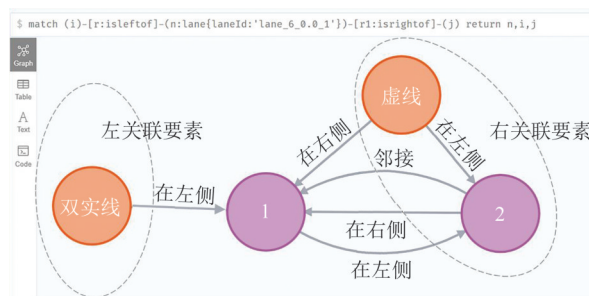


图6 高精地图知识图谱的查询示例

Fig. 6 Query Example in Knowledge Graph of High Definition Map

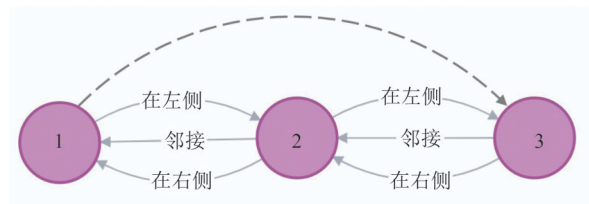


图7 知识推理要素示例

Fig. 7 Elements in Knowledge Inference Example

图8图示了CARLA仿真自动驾驶进行变道行为的局部决策过程。在仿真场景中,自车在右车道直线行驶(图8(a));通过摄像头识别出了前方同一车道有一行驶中的蓝色车辆(图8(b)),并持续根据两个车辆的速度和位置信息进行碰撞性检测。当发现两车之间的TTC低于阈值而存在碰撞风险时,触发局部决策机制。由图8可知,自车所在车道左侧为白色虚线,右侧为白色实线,因此车辆只能向左变道(图8(c)),图8(d)展示了自车完成变道。

高精地图知识图谱增强了高精地图的自动驾驶应用。在语义查询和知识推理方面,高精地图本身(如OpenStreetMap/OpenDRIVE)尽管能借助GIS的空间索引和分析功能进行空间数据的查询和空间拓扑关系的推理,但由于没有考虑或隐式表达语义关系^[29]而不能进行语义查询和逻辑推理。在决策规划方面,高精地图使用模仿学习来学习如何决定给定决策的运动,然而这种纯数据驱动的学习方法通常缺乏安全保障^[29]。高精地图知识图谱显式表达了语义关系,也能连接安全要求、交通规则或场景背景等额外知识,为语义查询、逻辑推理和安全运动规划提供

支撑。

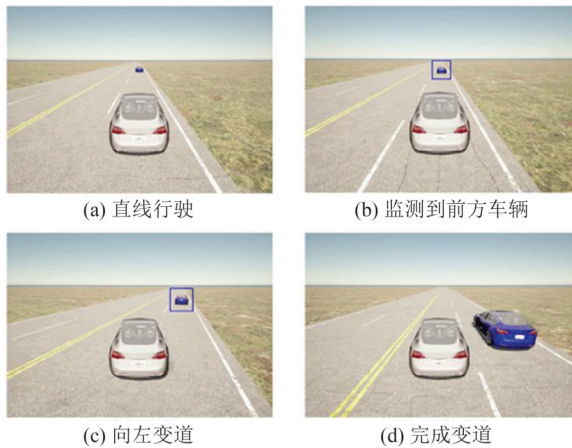


图 8 高精地图知识图谱局部决策

Fig. 8 Local Decision Making in Knowledge Graph of High Definition Map

4 结 语

本文在高精地图与自动驾驶应用之间引入了知识图谱的中间件,提出了高精地图知识图谱的构建方法。该方法的具体实现采用自顶向下的方式,即先构建知识图谱的模式层,后构建数据层。模式层的本体来源于多个通用的规范,如 GDF 5.1 和 OpenDRIVE,为本体的通用性和一致性提供了基础,本体关系的类型包括空间关系、时间关系和语义关系。数据层的构建是将高精地图数据集的实例映射到模式层的本体及其属性中,并继承本体类型的关系。为了验证和完善上述方法,本文实例构建了高精地图知识图谱,结果表明知识图谱能结构化显式表达高精地图中对象蕴含的语义以及对象间的语义关系、交通规则约束、交通场景等知识,实现了数据集-高精地图-知识图谱的数据-信息-知识的三层演进,为驾驶任务所需的语义关系查询、逻辑推理和运动规划等提供支撑。这样,知识图谱中间件的引入避免了驾驶任务应用从高精地图数据中感知和预测知识图谱中已有的对象和语义关系,也便于交通规则、安全验证等额外知识的连接,从而能缩小计算延迟和安全高效驾驶。开展更广泛的实例数据进行验证是后续研究的方向之一。

另一研究方向是构建高精地图知识图谱更具普适性的模式层。本文构建的模式层来源于高精地图的一个分层模型和几个标准规范,尚未覆盖其他模型和标准规范,这影响了模式层的通用性。未来将为每个通用模型、标准、规范建立独立的知识图谱模式层,并建立各模式层中本体

的映射图谱,从而形成更具有广泛性和通用性的高精地图知识图谱,为不同模型、标准规范约束下的数据集构建知识图谱及其共享提供基础。

本文构建知识图谱的自顶向下方法在构建和更新知识图谱上会耗费更多人工及时间成本^[28],后续研究将利用多源数据自动填充知识图谱。针对具体的自动驾驶任务,如对象感知与预测、轨迹预测、运动规划,结合构建的高精地图知识图谱,开展自动驾驶应用,并在此基础上研究高精地图知识图谱的评价体系和质量保证机制,研究知识图谱在生成和应用方面如何结合深度学习的技术,为知识图谱更新及在自动驾驶领域的应用提供新的研究路径。

参 考 文 献

- [1] Li Deren, Hong Yong, Wang Mi, et al. What can Surveying and Remote Sensing do for Intelligent Driving? [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(11): 1421-1431. (李德仁, 洪勇, 王密, 等. 测绘遥感能为智能驾驶做什么? [J]. 测绘学报, 2021, 50(11): 1421-1431.)
- [2] 王舒曼, 应申, 蒋跃文, 等. 智能驾驶场景中高精地图动静数据关联方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230224. (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.)
- [3] Zi Lu, Zhang Jiangshui, Yang Zhenkai, et al. Object Modeling Method of Traffic Elements in High-Precision Map [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2020, 37(6): 636-642. (曾璐, 张江水, 杨振凯, 等. 高精地图交通要素对象化建模方法 [J]. 测绘科学技术学报, 2020, 37(6): 636-642.)
- [4] Henson C, Schmid S, Tran A T, et al. Using a Knowledge Graph of Scenes to Enable Search of Autonomous Driving Data [C]//International Workshop on Semantic Evaluation, Minneapolis, USA, 2019.
- [5] 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.)
- [6] Eggert J, Salazar D A, Puphal T, et al. Driving Situation Analysis with Relational Local Dynamic Maps

- (R-LDM) [C]//International Symposium on Future Active Safety Technology Towards Zero-Traffic-Accidents, Nara, Japan, 2017.
- [7] Flade B, Nieto M, Velez G, et al. Lane Detection Based Camera to Map Alignment Using Open-source Map Data [C]//The 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems, Maui, USA, 2018.
- [8] Damerow F, Li Y D, Puphal T, et al. Intersection Warning System for Occlusion Risks Using Relational Local Dynamic Maps [J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2018, 10(4): 47-59.
- [9] Puphal T, Flade B, Probst M, et al. Online and Predictive Warning System for Forced Lane Changes Using Risk Maps [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2022, 7(3): 616-626.
- [10] García M, Urbieto I, Nieto M, et al. ILDM: An Interoperable Graph-Based Local Dynamic Map [J]. *Vehicles*, 2022, 4(1): 42-59.
- [11] Luetttin J, Monka S, Henson C, et al. A Survey on Knowledge Graph-Based Methods for Automated Driving [C]//Iberoamerican Knowledge Graphs and Semantic Web Conference, Madrid, Spain, 2022.
- [12] Zhang Ye, Jia Yuting, Fu Luoyi, et al. AceMap Academic Map and AceKG Academic Knowledge Graph for Academic Data Visualization [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2018, 52(10): 1357-1362. (张晔, 贾雨婷, 傅洛伊, 等. AceMap 学术地图与 AceKG 学术知识图谱: 学术数据可视化 [J]. *上海交通大学学报*, 2018, 52(10): 1357-1362.)
- [13] Eiter T, Füreder H, Kasslatner F, et al. Towards a Semantically Enriched Local Dynamic Map [J]. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 2019, 17(1): 32-48.
- [14] Liu Jingnan, Zhan Jiao, Guo Chi, et al. Data Logic Structure and Key Technologies on Intelligent High-Precision Map [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(8): 939-953. (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.)
- [15] Zhang Pan, Liu Jingnan. A Generalized Data Model of High Definition Maps [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(11): 1432-1446. (张攀, 刘经南. 通用化高精地图数据模型 [J]. *测绘学报*, 2021, 50(11): 1432-1446.)
- [16] Liu Jingnan, Dong Yang, Zhan Jiao, et al. Thoughts and Suggestions on Autonomous Driving Map Policy [J]. *Strategic Study of CAE*, 2019, 21(3): 92-97. (刘经南, 董杨, 詹骄, 等. 自动驾驶地图有关政策的思考和建议 [J]. *中国工程科学*, 2019, 21(3): 92-97.)
- [17] 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*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230287. (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)*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230287.)
- [18] 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.)
- [19] 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.)
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Tan Ying, Zhang Jin, Xia Lixin. Research on the Development and Status of Semantic Network [J]. *Documentation, Information and Knowledge*, 2019(6): 102-110. (谭荧, 张进, 夏立新. 语义网络发展历程与现状研究 [J]. *图书情报知识*, 2019(6): 102-110.)
- [23] Huang Hengqi, Yu Juan, Liao Xiao, et al. Review on Knowledge Graphs [J]. *Computer Systems & Applications*, 2019, 28(6): 1-12. (黄恒琪, 于娟, 廖晓, 等. 知识图谱研究综述 [J]. *计算机系统应用*, 2019, 28(6): 1-12.)
- [24] Berners-Lee T, Hendler J, Lassila O. The Semantic Web [J]. *Scientific American*, 2001, 284(5): 34-43.
- [25] Berners-Lee T. Linked Data [EB/OL]. (2009-06-18) [2023-02-21]. <https://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html>.
- [26] Jiang Bingchuan, Wan Gang, Xu Jian, et al. Geographic Knowledge Graph Building Extracted from Multi-sourced Heterogeneous Data [J]. *Acta Geo-*

- daetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(8): 1051-1061. (蒋秉川, 万刚, 许剑, 等. 多源异构数据的大规模地理知识图谱构建[J]. 测绘学报, 2018, 47(8): 1051-1061.)
- [27] Zhang Xueying, Zhang Chunju, Wu Mingguang, et al. Spatiotemporal Features Based Geographical Knowledge Graph Construction[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2020, 50(7): 1019-1032. (张雪英, 张春菊, 吴明光, 等. 顾及时空特征的地理知识图谱构建方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(7): 1019-1032.)
- [28] Xu Qiang, Cui Shenghua, Huang Wei, et al. Study on the Construction Method of Landslide Knowledge Map for Engineering Geology Field[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1601-1615. (许强, 崔圣华, 黄维, 等. 面向工程地质领域的滑坡知识图谱构建方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1601-1615.)
- [29] Halilaj L, Luetin J, Henson C, et al. Knowledge Graphs for Automated Driving[C]// IEEE Fifth International Conference on Artificial Intelligence and Knowledge Engineering, Laguna Hills, USA, 2022.
- [30] Halilaj L, Dindorkar I, Lüttin J, et al. A Knowledge Graph-Based Approach for Situation Comprehension in Driving Scenarios[C]// European Semantic Web Conference, Heraklion, Greece, 2021.
- [31] Wickramarachchi R, Henson C, Sheth A. Knowledge-Infused Learning for Entity Prediction in Driving Scenes[J]. *Frontiers in Big Data*, 2021, 4: 759110.
- [32] 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数据关联方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230224.)
- [33] Wang Tao, Chen Yanli, Jia Shuangcheng. Brief Description of the Characteristics of High Precision Map [J]. *Computer Engineering and Software*, 2018, 39(9): 183-187. (王涛, 陈艳丽, 贾双成. 简述高精地图的特点[J]. 软件, 2018, 39(9): 183-187.)
- [34] Zhang Yanjie, Huang Wei, Liu Xintao, et al. An Approach for High Definition Maps Information Interaction for Autonomous Driving [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230166. (张焱杰, 黄炜, 刘信陶, 等. 自动驾驶高精地图信息交互方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230166.)
- [35] Yang Zhenkai, Hua Yixin, Zi Lu, et al. Analysis of the Development Status and Key Technologies of High-Precision Map [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(6): 54-60. (杨振凯, 华一新, 翥璐, 等. 浅析高精度地图发展现状及关键技术[J]. 测绘通报, 2021(6): 54-60.)
- [36] Noh S, An K. Decision-Making Framework for Automated Driving in Highway Environments [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(1): 58-71.