



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院空天信息创新研究院
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2021
01
VOL.26

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB





第26卷第1期 (总第297期)

2021年1月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿, 均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版, 所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用, 所有内容, 未经许可, 不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院
主办单位 中国科学院空天信息创新研究院
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 吴一戎
编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
通信地址 北京市海淀区北四环西路19号
邮 编 100190
电子信箱 jig@radi.ac.cn
电 话 010-58887035
网 址 www.cjig.cn

广告发布登记号 京朝工商广登字20170218号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)
印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Aerospace Information Research Institute, CAS
China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief Wu Yirong
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics
Address No. 19, North 4th Ring Road West, Haidian District, Beijing, P. R. China
Zip code 100190
E-mail jig@radi.ac.cn
Telephone 010-58887035
Website www.cjig.cn

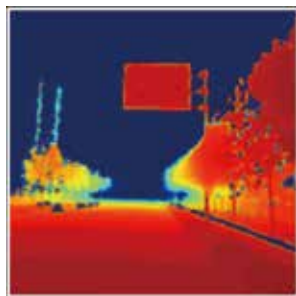
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB
ISSN 1006-8961
CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406
国内邮发代号 82-831
国内定价 60.00元



面向智能驾驶的平行视觉感知：基本概念、框架与应用
(第0067页)



Edge-guided GAN: 边界信息引导的深度图像修复
(第0186页)



利用边缘计算的多车协同激光雷达SLAM(第0218页)

序言	王飞跃, 张云泉 I
编者按	II

综述

面向智能驾驶测试的仿真场景构建技术综述	
任秉韬, 邓伟文, 白雪松, 李江坤, 纵瑞雪, 朱冰, 丁娟	0001
自动驾驶软件测试技术研究综述	
冯洋, 夏志龙, 郭安, 陈振宇	0013
强化学习的自动驾驶控制技术研究进展	
潘峰, 鲍泓	0028
自动驾驶地图的数据标准比较研究	
詹骄, 郭迟, 雷婷婷, 屈宜琪, 吴杭彬, 刘经南	0036
视觉感知的端到端自动驾驶运动规划综述	
刘旒菲, 胡学敏, 陈国文, 刘士豪, 陈龙	0049

平行驾驶

面向智能驾驶的平行视觉感知：基本概念、框架与应用	
李轩, 王飞跃	0067
平行视觉的基本框架与关键算法	
张慧, 李轩, 王飞跃	0082

目标检测与跟踪

自动驾驶场景的尺度感知实时行人检测	
徐歆恺, 马岩, 钱旭, 张龔	0093
实时视觉目标跟踪与视频对象分割多任务框架	
李瀚, 刘坤华, 刘嘉杰, 张晓晔	0101
提升预测框定位稳定性的视频目标检测	
郝腾龙, 李熙莹	0113
道路结构特征下的车道线智能检测	
张翔, 唐小林, 黄岩军	0123
适用全速域大曲率路径的自动驾驶跟踪算法	
张龔, 郑颖, 鲍泓	0135
伪3D卷积神经网络与注意力机制结合的疲劳驾驶检测	
庄员, 戚湧	0143
基于眼部自商图—梯度图共生矩阵的疲劳驾驶检测	
潘剑凯, 柳政卿, 王秋成	0154

自动驾驶场景感知与仿真

结合局部平面参数预测的无监督单目图像深度估计	
周大可, 田径, 杨欣	0165
深度纯追随的拟人化无人驾驶转向控制模型	
单云霄, 黄润辉, 何泽, 龚志豪, 景民, 邹雪松	0176
Edge-guided GAN: 边界信息引导的深度图像修复	
刘坤华, 王雪辉, 谢玉婷, 胡坚耀	0186
引入概率分布的深度神经网络贪婪剪枝	
胡骏, 黄启鹏, 刘嘉昕, 刘威, 袁淮, 赵宏	0198

高精地图构建与SLAM

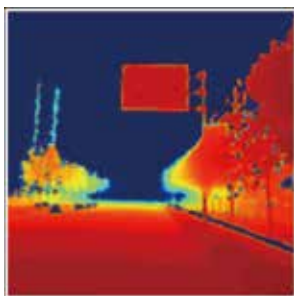
开放道路中匹配高精度地图的在线相机外参标定	
廖文龙, 赵华卿, 严骏驰	0208
利用边缘计算的多车协同激光雷达SLAM	
崔明月, 钟仕鹏, 刘思瑶, 李博洋, 吴成昊, 黄凯	0218

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Parallel visual perception for intelligent driving: basic concept, framework and application (P0067)



Edge-guided GAN: a depth image inpainting approach guided by edge information (P0186)



Cooperative LiDAR SLAM for multi-vehicles based on edge computing (P0218)

Review

- Technologies of virtual scenario construction for intelligent driving testing
Ren Bingtao, Deng Weiwen, Bai Xuesong, Li Jiangkun, Zong Ruixue, Zhu Bing, Ding Juan 0001
- Survey of testing techniques of autonomous driving software
Feng Yang, Xia Zhilong, Guo An, Chen Zhenyu 0013
- Research progress of automatic driving control technology based on reinforcement learning
Pan Feng, Bao Hong 0028
- Comparative study on data standards of autonomous driving map
Zhan Jiao, Guo Chi, Lei Tingting, Qu Yiqi, Wu Hangbin, Liu Jingnan 0036
- Review of end-to-end motion planning for autonomous driving with visual perception
Liu Yifei, Hu Xuemin, Chen Guowen, Liu Shihao, Chen Long 0049

Parallel Driving

- Parallel visual perception for intelligent driving: basic concept, framework and application
Li Xuan, Wang Feiyue 0067
- The basic framework and key algorithms of parallel vision
Zhang Hui, Li Xuan, Wang Feiyue 0082

Object Detection and Tracking

- Scale-aware EfficientDet: real-time pedestrian detection algorithm for automated driving
Xu Xinkai, Ma Yan, Qian Xu, Zhang Yan 0093
- Multitask framework for video object tracking and segmentation combined with multi-scale inter-frame information
Li Han, Liu Kunhua, Liu Jiajie, Zhang Xiaoye 0101
- Video object detection method for improving the stability of bounding box
Hao Tenglong, Li Xiying 0113
- Intelligent detection of lane based on road structure characteristics
Zhang Xiang, Tang Xiaolin, Huang Yanjun 0123
- Autonomous vehicle tracking algorithm for high curvature path in full speed range
Zhang Yan, Zheng Ying, Bao Hong 0135
- Driving fatigue detection based on pseudo 3D convolutional neural network and attention mechanisms
Zhuang Yuan, Qi Yong 0143
- Fatigue driving detection based on ocular self-quotient image and gradient image co-occurrence matrix
Pan Jiankai, Liu Zhengqing, Wang Qiucheng 0154

Scene Perception and Simulation of Autonomous Driving

- Unsupervised monocular image depth estimation based on the prediction of local plane parameters
Zhou Dake, Tian Jing, Yang Xin 0165
- Human-like steering model for autonomous driving based on deep pure pursuit method
Shan Yunxiao, Huang Runhui, He Ze, Gong Zhihao, Jing Min, Zou Xuesong 0176
- Edge-guided GAN: a depth image inpainting approach guided by edge information
Liu Kunhua, Wang Xuehui, Xie Yuting, Hu Jianyao 0186
- Greedy pruning of deep neural networks fused with probability distribution
Hu Jun, Huang Qipeng, Liu Jiaxin, Liu Wei, Yuan Huai, Zhao Hong 0198

High-Definition Map Construction and SLAM

- Online extrinsic camera calibration based on high-definition map matching on public roadway
Liao Wenlong, Zhao Huaqing, Yan Junchi 0208
- Cooperative LiDAR SLAM for multi-vehicles based on edge computing
Cui Mingyue, Zhong Shipeng, Liu Siyao, Li Boyang, Wu Chenghao, Huang Kai 0218

中图法分类号: P208 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2021)01-0036-13

论文引用格式: Zhan J, Guo C, Lei T T, Qu Y Q, Wu H B and Liu J N. 2021. Comparative study on data standards of autonomous driving map. Journal of Image and Graphics, 26(01): 0036-0048 (詹骄, 郭迟, 雷婷婷, 屈宜琪, 吴杭彬, 刘经南. 2021. 自动驾驶地图的数据标准比较研究. 中国图象图形学报, 26(01): 0036-0048) [DOI:10.11834/jig.200414]

自动驾驶地图的数据标准比较研究

詹骄¹, 郭迟^{1,2}, 雷婷婷³, 屈宜琪⁴, 吴杭彬⁴, 刘经南¹

1. 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉 430079; 2. 武汉大学人工智能研究院, 武汉 430079;
3. 武汉大学测绘学院, 武汉 430079; 4. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092

摘要: 作为实现汽车自动驾驶的关键基础设施, 自动驾驶地图能够提供大量准确且语义丰富的数据来帮助用户以更精细的尺度了解周边环境状况, 辅助感知、定位、驾驶规划与决策控制, 满足智能时代多种高层次的应用需求, 进而切实推动我国自动驾驶相关领域的发展与商业化应用。自动驾驶地图的数据标准作为自动驾驶地图生产应用的指导性规范之一, 是自动驾驶地图数据标准化的基准。当前我国自动驾驶相关领域对自动驾驶地图标准化的需求迫切, 地图数据标准化已成为业界共同关注的热点问题。为解决自动驾驶地图数据标准化问题, 切实推动自动驾驶地图的高效发展, 本文对自动驾驶地图的数据标准进行比较研究。首先介绍国内外主流的自动驾驶地图数据标准, 然后针对其中4种: 导航数据标准(navigation data standard, NDS)、OpenDrive、智能运输系统智能驾驶电子地图数据模型与交换格式和道路高精度电子导航地图数据规范进行分析比较研究, 主要从数据结构、数据模型、地图渲染和协同应用4个维度展开, 并在各个维度上给出数据标准编制时建议遵循的原则。基于分析比较研究的结果, 总结出自动驾驶地图数据标准编制时建议遵循的原则。通过对自动驾驶地图的数据标准进行分析比较研究, 归纳总结出数据标准编制时建议遵循的原则, 这些建议遵循的编制原则对我国相应规格标准的制定具有借鉴意义。

关键词: 自动驾驶; 自动驾驶地图; 数据标准; 自动驾驶地图数据标准; 编制原则

Comparative study on data standards of autonomous driving map

Zhan Jiao¹, Guo Chi^{1,2}, Lei Tingting³, Qu Yiqi⁴, Wu Hangbin⁴, Liu Jingnan¹

1. Research Center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Artificial Intelligence Institute, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
4. College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: As a key infrastructure to realize autonomous driving, an autonomous driving map can provide a large amount of accurate and semantically rich data to help users understand the surrounding environment in a more detailed scale; assist perception, positioning, driving planning, and decision control; and meet various high-level application requirements in the era of intelligence and then effectively promote the development and commercial application of China's autonomous driving related fields. An autonomous driving map data standard guides the production and application of autonomous driving maps, thus serving as the benchmark for the standardization of autonomous driving map data. At present, there is an urgent need for autonomous driving map standardization is urgently needed in the fields related to autonomous driving in China, and map

收稿日期: 2020-07-25; 修回日期: 2020-10-23; 预印本日期: 2020-10-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1305001); 国家测绘地理信息标准制定项目

Supported by: National Key Research and Development Program of China(2018YFB1305001); The Standards Establishment Project of National Surveying and Mapping Geographic Information

data standardization has become a hot issue of common concern in the industry. To solve the problem of autonomous driving map data standardization and promote the efficient development of autonomous driving maps, this paper conducts a comparative study on data standards of autonomous driving maps. First, this paper briefly introduces the mainstream autonomous driving map data standards at home and abroad. Popular international autonomous driving map data standards mainly include NDS (navigation data standard), OpenDrive, and Kiwi. The development of autonomous driving map data standards in China started relatively late compared with that in foreign countries. Most of the relevant standards are in the state of formulation or project approval and have not been commercialized on a large scale. At present, domestic mainstream autonomous driving map data standards mainly include intelligent transportation system-intelligent map data model and exchange format specification, road high-precision electronic navigation map data specification, and Apollo OpenDrive. Second, this paper analyzes and compares four of them, namely, NDS, OpenDrive, intelligent transportation system-intelligent map data model and exchange format specification, and road high-precision electronic navigation map data specification. The comparative research is mainly carried out from four dimensions of data structure, data model, map rendering and collaborative application, and the proposed principles for data standard compilation are given in each dimension: 1) In terms of data structures, the data structure of autonomous driving map can be divided into logical structure and physical structure, which are closely related and often serve as the basic content of each data standard to determine the definition of data standard in map data file storage format and data logic organization model, thus directly affecting the compilation of data standard. By comparing and analyzing the data structures defined by the four autonomous driving map data standards, this paper clearly suggests that the database technology should be used to store map data in the form of tables, and the hierarchical data organization method should be adopted to support flexible and efficient data storage, interaction, and update. 2) In terms of data models, the data model is used to specify the elements (objects), attributes, and relationships contained in the autonomous driving map data, and explains how to carry out data classification, coding, geometry, and topology representation, thus often serving as the core content of each data standard. By comparing and analyzing the data models defined by the four autonomous driving map data standards, this paper clearly suggests that, on the basis of further expanding the data content of autonomous driving map to include more relevant elements and attributes, a method similar to map layerization should be adopted to modularize the data organization (including geometric topology network data), to improve the flexibility and applicability of autonomous driving maps. 3) In terms of map rendering, autonomous driving map will be oriented to the human-computer shared environment in the future, which needs to meet the needs of both human map recognition and machine understanding. Therefore, the map data standard should include map rendering and support hierarchical map display to improve the efficiency of map display and path calculation. 4) In terms of collaborative applications, after years of development, a standard navigation map has become rich in road traffic information, such as point-of-interest information, which focuses on describing the real world in a macro sense. By contrast, an autonomous driving map focuses on describing the environmental conditions of roads and surrounding areas, as well as the topological connection relationship between lanes. Although an autonomous driving map has more accurate road and lane geometry data, it lacks the rich data content of standard navigation maps and especially lacks point-of-interest information, which makes the navigation function difficult to realize. To address this problem, the cooperative application relationship between autonomous driving map and standard navigation map needs to be established, which can ensure complementary information between an autonomous driving map and a standard navigation map, and then effectively deal with different requirements. On the basis of the results of comparative analysis, this paper summarizes the principles that should be followed when compiling the data standard of autonomous driving maps. By analyzing and comparing the data standards of autonomous driving map, this paper summarizes the proposed principles in compiling data standards, which are of reference significance to the formulation of relevant specifications and standards in China.

Key words: autonomous driving; autonomous driving map; data standard; autonomous driving map data standard; compiling principle

0 引言

自动驾驶汽车工业作为大数据、人工智能、自动化控制、网络通信等多种先进技术的集成产物,对于促进国家社会、经济、科技、安全发展,带动国家制造业转型升级及产业发展具有重要意义(李克强等,2017)。各国纷纷布局自动驾驶汽车工业,意图占据未来人工智能领域的制高点。自动驾驶地图作为实现汽车自动驾驶的重要环节,是交通资源全时空实时感知的载体和交通工具全过程运行管控的依据(刘经南等,2019a)。相比于标准导航地图,自动驾驶地图能够提供大量准确且语义丰富的数据来帮助用户以更精细的尺度了解周边环境的真实状况,辅助车辆感知、定位、驾驶规划与决策控制,满足智能时代多种高层次的应用需求,如高级驾驶辅助系统(advanced driving assistance system, ADAS)、高级自动驾驶(highly automated driving, HAD)、互联网交通精细化执法管理等。

作为导航与位置服务产品的核心,自动驾驶地图对位置精度(厘米级)与道路路况变化表达(秒级)的高要求需要与之匹配的地图数据维护与更新方法进行支撑,仅依靠现有高精度、高成本、基于移动测量系统(mobile mapping system, MMS)的专业测绘难以实现。众包作为地图更新领域的一种共享商业模式,能充分利用群体智能实现自动驾驶地图数据更新的实时化与低成本化,是业内公认的自动驾驶地图未来形态(刘经南等,2020)。融合专业测绘在精度与众包在信息效用方面的优势而构建的“专业测绘+众包”的自动驾驶地图数据维护更新方法是一个有效的解决策略,也是目前各大参与企业采用的方案。此方法的顺利实施要求自动驾驶地图数据必须实现跨平台共享,支持融入多源数据、多方式的周期性数据更新,进而能有效应对不同应用需求(Guo等,2015; Seif和Hu, 2016; Bauer等, 2016; 陈龙等,2020)。然而空间数据标准一致性的缺乏使得现有数据资源无法充分利用,大量数据停留于满足单一应用,难以实现数据共享。从应用角度看,比较有效的解决策略是各方采用统一的数据规格或存储格式,即在统一的自动驾驶地图数据标准约束下组织数据,通过数据互换与共享实现道路信息的全时空覆盖,进而切实推动自动驾驶地图相关产业

的发展(刘经南等,2018)。

自动驾驶地图的数据标准作为自动驾驶地图生产应用的指导性规范之一,是自动驾驶地图数据标准化的基准。其本质是对空间数据的组织,即通过一定方式与规则对空间数据进行归并、存储与处理,以支持数据的高效存储与交互。自动驾驶地图的数据标准目前国际上以欧洲为主导,如导航数据标准(navigation data standard, NDS)与OpenDrive。相比之下,国内地理信息标准化工作委员会、中国智能网联汽车产业创新联盟自动驾驶地图工作组、中国智能交通产业联盟等也开始着手相关标准制定工作,但进度相对滞后且需进一步协同立场,亟待整合测绘、汽车和交通全行业资源制定具有我国特色的行业统一标准(刘经南等,2019b)。

为解决自动驾驶地图数据标准化问题,支持我国相关产业发展,本文对自动驾驶地图的数据标准进行比较研究,主要包括:1)介绍国内外主流的自动驾驶地图数据标准;2)针对其中4种数据标准:NDS(研究基于NDS V 2.5.4)、OpenDrive(研究基于OpenDrive V 1.5M)、智能运输系统智能驾驶电子地图数据模型与交换格式(研究基于征求意见稿)和道路高精度电子导航地图数据规范(研究基于征求意见稿)进行分析比较研究;3)基于分析比较研究的结果,总结出自动驾驶地图数据标准编制时建议遵循的原则。

1 国内外相关标准概况

1.1 国外相关标准概况

目前国际上流行的自动驾驶地图数据标准主要有NDS、OpenDrive、Kiwi和OpenStreetMap等。

1) NDS。NDS是一种用于导航系统的标准化物理存储格式,其突出特点是在兼顾性能和功能的基础上,采用了数据库技术存储数据,能够较好地解决地图增量更新、地图数据扩展和数据安全问题。NDS格式以构建块(building block)来组织数据,如名称(name)构建块和兴趣点(point of interest, POI)构建块,每个构建块提供NDS的特定功能。同时NDS格式以层次型瓦片方案(hierarchical tiling schema)对构建块进行分层分区,覆盖整个地球表面。

对于HAD, NDS地图数据格式主要提供了4个特定的构建块,用于分层数据并相互引用数据:(1)

车道构建块,包含用于HAD和增强导航功能的高级车道信息,如车道几何、车道属性等;(2)障碍物构建块,对路缘障碍物进行建模;(3)定位地标构建块,对可用于定位的地标进行建模;(4)路由构建块,为其他构建块提供底层拓扑网络。未来新版NDS称为NDS.Live,新一代规范的重点是支持嵌入式(不经常变化的地图数据采用嵌入式)与可流数据(变化频繁的地图数据经云端传输到车辆上)的组合以更好地支持高级自动驾驶(Navigation Data Standard,2016)。

2) OpenDrive。OpenDrive是自动化及测量系统标准协会(Association for Standardisation of Automation and Measuring Systems,ASAM)的OpenX系列标准之一,是一种用于对仿真测试场景的静态部分进行描述的开放文件格式,是目前主流的地图数据格式。其文件格式为可扩展标记语言(extensible markup language,XML),允许使用与真实道路相同的元素(直线、曲线、高程剖面、车道和标志等)来精确描述道路,并兼容左右驾驶规则。标准定义的具体内容主要分为道路(road)与路口(junction)两大类。其本身设计面向的应用是仿真器,因而自动驾驶所需要的更多信息OpenDrive并未完全提供(Dupuis等,2010)。

3) Kiwi。Kiwi是由日本Kiwi协会(KIWI-W Consortium)制定的日本导航地图格式标准,采用数据物理存储和数据逻辑结构相结合的机制。KIWI主要目的是提供一种通用地图数据存储格式以满足嵌入式应用快速精确与高效的需求。Kiwi按照分层、分块的结构来组织地图,各层逻辑结构与其物理存储相关联,进而实现数据在纵向上不同层之间的快速引用、在横向上相邻地块间的快速取用(马威,2010)。

4) OpenStreetMap。OpenStreetMap简称OSM,是一个由网络大众构建的开源、可个人编辑、非营利性的网上地图协作项目,其文件格式为XML(Haklay和Weber,2008)。OSM信息由4种类型的数据(节点、路径、关联和标签)表示:(1)node(节点),用以表示地球表面的一个位置,具有经纬度坐标;(2)way(路径),构成折线的一组节点,可用于表示线状对象(如道路网)或面状对象(如建筑物);(3)relation(关联),描述对象之间的关联关系;(4>tag(标签),记录对象属性信息的键-值对。OSM不包含车道级的几何拓扑与相关属性信息,但众多专家学

者对其进行了修改与扩展以支持自动驾驶汽车的应用,如Lanelets(Bender等,2014)与GeoScenario(Queiroz等,2019)。

1.2 国内相关标准概况

国内自动驾驶地图数据标准的制定工作相比国外起步较晚,相关标准大多处于制定或立项状态,尚未进行大规模商业化应用。当前国内主流的自动驾驶地图数据标准主要有智能运输系统智能驾驶电子地图数据模型与交换格式、道路高精度电子导航地图数据规范和Apollo OpenDrive等。

1) 智能运输系统智能驾驶电子地图数据模型与交换格式。标准分为高速公路与城市道路两部分。标准规定了智能汽车电子地图中高速道路及城市道路数据模型与交换格式的产品要求,包括术语和定义、精度、坐标系统、数据内容、基本属性及数据模型等。标准具体内容主要分为道路模型与对象模型两大类,道路模型主要重构表达真实世界的道路,对象模型主要用于与车辆感知数据匹配以进行智能驾驶车辆准确定位。

2) 道路高精度电子导航地图数据规范。标准规定了道路高精度电子导航地图产品的地图数据组织与地图渲染要求,包括:术语与定义、一般要求、地图数据组织要求、地图渲染要求、几何网络与元数据。标准适用于地图厂商生产道路高精度电子导航地图以及管理机构审查地图,以支持高级驾驶辅助系统、L3级及以上自动驾驶汽车、机器人导航和互联网交通精细化执法管理等应用。

3) Apollo OpenDrive。Apollo OpenDrive是百度公司结合OpenDrive的规范基础与百度在自动驾驶方面的技术经验扩展修改而成的一种自动驾驶地图数据格式,相对于标准OpenDrive规范,在数据表达与功能实现上更加简单,对自动驾驶开发者也更为友好(Apollo,2018)。

2 自动驾驶地图数据标准的分析比较

自动驾驶地图数据标准编制的目的在于规范自动驾驶地图数据的组织、交换和共享等,便于地图数据的标准化及其推广应用。不同数据标准编制时会遵循各自的编制原则来规范地图数据,这些编制原则会直接影响数据标准的制定,进而影响自动驾驶地图的生产与应用。为切实推动自动驾驶地图数据标准

的确立,加快自动驾驶地图数据标准化的进程,自动驾驶地图的数据标准编制时应遵循有效的编制原则。

综上,本文着重对 NDS、OpenDrive、智能运输系统智能驾驶电子地图数据模型与交换格式和道路高精度电子导航地图数据规范这 4 种国内外主流的自动驾驶地图数据标准进行分析比较研究。研究主要从数据结构、数据模型、地图渲染和协同应用 4 个维度展开,并在各个维度上给出数据标准编制时建议遵循的原则。这些建议遵循的编制原则对我国相应规格标准的制定具有借鉴意义。

2.1 数据结构

自动驾驶地图的数据结构分为逻辑结构(反映数据元素之间逻辑关系的数据结构,是对数据在逻辑层面上的组织)和物理结构(数据逻辑结构在物理存储空间的存放形式,是对数据在实现层面上的组织),二者密切相关,往往作为各个数据标准的基础内容,决定数据标准对地图数据文件存储格式、数据逻辑组织模型等的定义,进而直接影响数据标准的编制。通过对 4 种自动驾驶地图数据标准所定义的数据结构(见表1及图1—图4)进行比较分析,给出自动

表 1 自动驾驶地图数据结构
Table 1 Autonomous driving map data structure

标准名称	文件存储格式	逻辑组织模型	分区方案
NDS	SQLite 文件格式	NDS 的逻辑组织模型可概括为“NDS 数据库—产品数据库—更新区域—构建块—要素类—要素”的层次结构如图 1 所示。 1) NDS 数据库是数据逻辑组织模型的最高层次,可由一个或多个产品数据库组成,每个产品数据库都是由一个数据库供应商提供,带有独立的版本控制,可独立于其他产品数据库进行更新。产品数据库可包含一个或多个更新区域的导航数据,每个更新区域都是产品数据库中可独立数据更新的区域。 2) 构建块是数据逻辑组织模型的重要存储单位,典型的构建块如基础地图显示(basic map display)、兴趣点(POI)等。NDS 中的所有导航数据均被认为是属于某个构建块的,每个构建块提供 NDS 的特定功能,如路由(routing)构建块可用于路径计算、路由导航与地图匹配。同时,部分构建块的导航数据可被分割成不同的层级,以支持高效的地图显示与路径计算。 3) 要素类由一个或多个要素组成。要素是数据逻辑组织模型的最基础层次,代表一个真实世界的对象。NDS 中所有与导航相关的实际对象都在 NDS 数据库中有一个表示,并映射到一个或多个要素类的实例。	NDS 采用分区方案(tiling scheme)将每个层级划分为多个瓦片(tile),即将地球表面划分为多个近似矩形的格子,以支持高效的数据管理。
OpenDrive	XML 文件格式	OpenDrive 的逻辑组织模型基于 XML 文件格式的树状结构。所有数据组织在节点中,从根节点开始扩展至最底端,形成一个多层次的树结构。其主要结构为图 2 所示(图中仅包含部分重要节点)。 1) Header(头记录)及其子节点记录地理参考、数据库版本号等信息。 2) Road(道路)是信息存储的主要容器,Road 及其子节点记录道路类型、道路标记、车道等多种信息。 3) Junction(路口)及其子节点记录道路路口处的信息。	未涉及
智能运输系统智能驾驶电子地图数据模型与交换格式	数据库表文件	数据组织为道路模型与对象模型两大类,其逻辑组织模型如图 3 所示。 1) 道路模型:道路模型主要重构真实世界的道路,包括道路、车道与路口对象。 2) 对象模型:对象模型主要用于匹配定位,包括交通标牌、道路交通标线等对象。	未涉及
道路高精度电子导航地图数据规范	数据库表文件	逻辑组织模型可概括为“地图—图幅—图层组—图层—要素”的层次结构如图 4 所示。 1) 地图:数据逻辑组织模型的最高层次,对整个图集进行管理。 2) 图幅:数据逻辑组织模型的二级存储单位,按一定方式将道路高精度电子导航地图划分为若干单幅地图,图幅间建立空间索引。图幅包含多个图层组。 3) 图层组:数据逻辑组织模型的三级存储单位,包含多个图层。每个图层组支持特定功能,如道路设施层组常用于车辆定位。 4) 图层:数据逻辑组织模型的四级存储单位,包含多个要素。 5) 要素:数据逻辑组织模型的最基础层次,是各种实体一般性的抽象,数据库中以记录的形式存储。	标准在水平方向上采用分幅的方法,即沿地球表面的水平方向对制图区域进行划分,进而对可用数据进行分区存储,以支持高效的数据管理

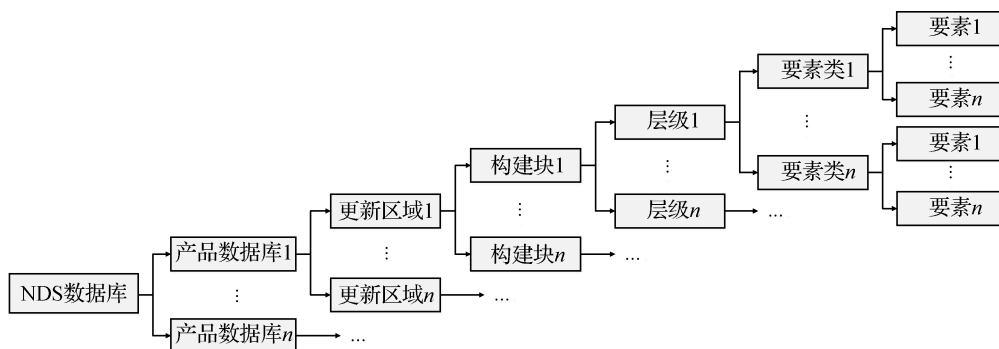


图1 NDS 数据分层组织结构

Fig. 1 Data hierarchical organization structure of NDS

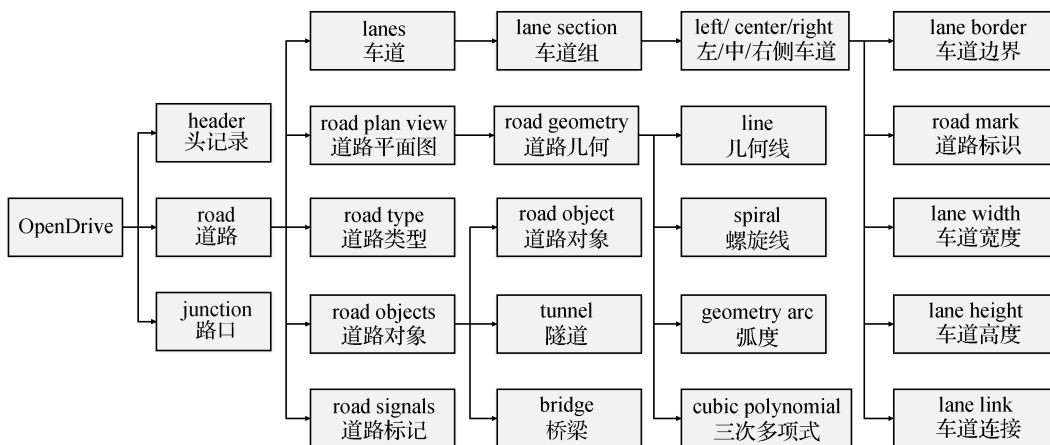


图2 OpenDrive 数据分层组织结构

Fig. 2 Data hierarchical organization structure of OpenDrive

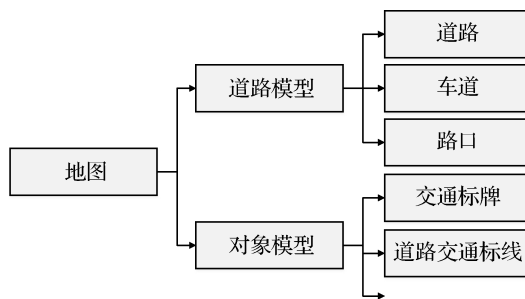


图3 智能运输系统智能驾驶电子地图数据分层组织结构

Fig. 3 Data hierarchical organization structure of intelligent transportation system-intelligent map

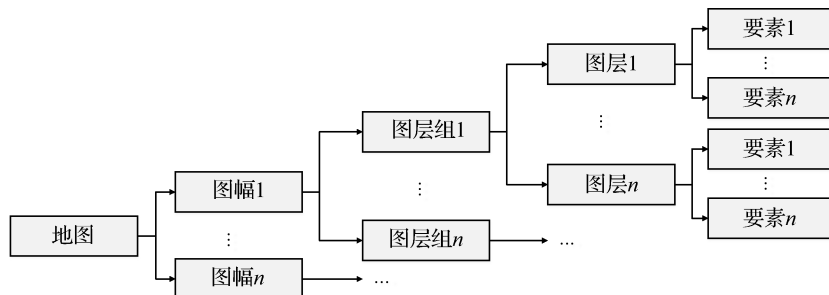


图4 道路高精度电子导航地图数据分层组织结构

Fig. 4 Data hierarchical organization structure of road high-precision electronic navigation map

驾驶地图的数据标准编制时建议采用的数据结构。

基于表 1 所述,对数据结构的分析主要从文件存储格式、逻辑组织模型和分区方案 3 方面展开,具体如下:

1) 文件存储格式。OpenDrive 采用 XML 文件格式,其他 3 种均采用数据库表文件的形式。XML 作为非专有的格式,具有天然的平台无关与语言无关性,这使得 XML 具有跨平台跨系统的特性,而不用限定和依靠于对特定软件的理解。XML 也是一种可扩展的语言,只要符合 XML 的基本语法与嵌套规则,就可以根据需求自定义标记名,这种特性有助于地图数据的扩展(吴明光等,2011;陈久军等,2007)。然而自动驾驶地图往往需要大范围内足量且实时的有效道路数据来支撑周期性的地图数据更新,使用 XML 来存储这些海量道路数据会导致 XML 文件庞大且复杂,XML 文件节点与深度的显著增加导致云端与终端层需花费较多的资源与时间来解析 XML 文件,不利于地图数据的高效存储与交互。而采用数据库技术,以表的形式存储数据,能够较好地存储与管理大量数据,有效支持自动驾驶地图的增量更新、数据扩展和数据安全等。

2) 逻辑组织模型。4 种数据标准均采用了层次结构,各层数据均有相应的功能与权限。层次结构支持灵活的版本迭代更新,当地图数据版本需要更新时,替换发生变化的层即可。同时,层次化的逻辑组织模型可以明确地反映出数据的逻辑组织与物理存储之间的关联关系,有助于自动驾驶地图的设计、实现和标准化。

3) 分区方案。NDS 与道路高精度电子导航地图数据规范采用了分区方案,沿地球表面的水平方向对区域进行划分。分区方案可以支持高效的数据管理,如数据库的增量更新(每个分区可以作为一个更新单元,以支持灵活和持续的版本更新迭代)与快速数据访问(程序可以根据应用需求高效加载某一地理区域内的所有数据,加快地图显示与路径计算速度)(李连营等,2009)。

综上,建议在数据标准编制时采用数据库技术以表的形式存储数据,并采用分层(层次化的逻辑组织模型)分区的数据组织方法,以支持灵活高效的数据存储、交互与更新。

2.2 数据模型

数据模型用于规定自动驾驶地图数据所包含的

要素(对象)、属性和关系等,并说明了如何进行数据分类、编码、几何和拓扑表达等(任玉环等,2015),因而往往作为各个数据标准的核心内容。各标准对数据模型的定义大多受地理数据文件(geographical data file, GDF)规范的影响,包括要素、要素之间的关系、属性等方面内容。同时各标准又会根据自身编制特点对数据模型进行修改与扩展,因而在数据模型的最终定义上存在差异。通过对 4 种自动驾驶地图数据标准所定义的数据模型(见表 2)进行比较分析,给出自动驾驶地图数据标准编制时建议采用的数据模型。

基于表 2 所述,对数据模型的分析主要从数据分类、要素表达和拓扑网络 3 方面展开,具体如下:

1) 数据分类。NDS 与道路高精度电子导航地图数据规范采用了类似于地图图层分层的方法(道路高精度电子导航地图图层组分层结构示意图见图 5),将地图数据模块化组织,每个模块(即每个构建块或图层组)完成一个特定的子功能,通过过滤与聚合来自不同模块的数据,进而有效应对不同应用需求(如高级驾驶辅助系统)与功能需求(如路径计算、地图匹配)(徐琳和梁发宏,2011)。采用这种图层分层结构,一方面能够赋予自动驾驶地图更强的灵活性与适用性,进而有效应对不同需求;另一方面更加有利于维护管理,以支持灵活高效的数据更新,以 NDS 为例,当道路名称发生变化时,仅需对名称(name)构建块进行维护,而不影响其他构建块。

2) 要素表达。从方法上看,4 种数据标准对于真实世界对象的抽象描述并无实质性的差异,均从属性、几何和关联关系等方面入手进行规定,并记录有元数据。但从内容详细程度上看,存在较大差异。NDS 作为目前领先的地图数据标准,包含有更多的要素、属性与关联关系,不仅能提供标准导航地图所需的 POI 信息、道路网信息等,而且能提供自动驾驶汽车或高级辅助驾驶系统所需的详细车道信息、定位地标信息等,并通过交通信息(traffic information)构建块和易失性数据(volatile data)构建块进行动态信息的接入。此外,自动驾驶地图的适用领域扩展与周期性数据更新需要融入大量多源异构数据,数据标准所规定的范围往往难以覆盖所有的数据类型。基于此 NDS 也定义了地图数据扩展规则,允许用户在遵循 NDS 相关扩展规

表2 自动驾驶地图数据模型
Table 2 Autonomous driving map data model

标准名称	数据分类	要素表达	拓扑网络
NDS	NDS 将地图数据组织成独立的构建块,构建块按功能可分为4 大类: 1)索引结构,如全文搜索(full-text search)构建块。 2)导航与地图展示,如基础地图显示(basic map display)构建块。 3)高级可视化,如3D 对象(3D objects)构建块。 4)高级自动驾驶,如定位地标(localization landmark)构建块。 构建块可包含一个或多个要素类,要素类又可包含一个或多个要素。	NDS 从属性、几何、关联关系等多个方面入手进行规定,并记录有元数据	路由构建块记录道路几何拓扑网络,车道构建块记录车道几何拓扑网络
OpenDrive	OpenDrive 将地图数据组织成 XML 节点,主要存储在 road (道路)与 junction (路口)两个节点之下。将 road(道路)作为信息存储的主要容器,通过 road(道路)及其子节点记录了道路类型、道路对象、道路标记、车道组、车道等多种信息。	OpenDrive 采用 XML 文件形式,对各个导航相关对象从属性、几何、关联关系等多个方面入手进行规定,并记录有元数据	并未直接记录几何拓扑网络,应用需要时可通过道路连接、车道连接、路口连接等生成几何拓扑网络
智能运输系统智能驾驶电子地图数据模型与交换格式	标准将地图数据组织为两个模型,从地图应用角度可分为: 1)道路模型(包括道路、车道与路口等对象)。 2)对象模型(包括交通标牌、道路交通标线等对象)。	对于每个对象,标准从属性、几何和关联关系入手进行规定,并记录有元数据	并未直接记录几何拓扑网络,应用需要时可通过道路对象和车道对象和路口对象的相关信息生成道路与车道几何拓扑网络
道路高精度电子导航地图数据规范	标准将地图数据组织成独立的图层组,图层组按功能可分为道路网图层组、车道网图层组、道路标线层组、道路设施层组、临时信息层组和自定义图层组。图层组包含一个或多个图层,图层又可包含一个或多个对象。	对于每个对象,标准从属性、几何和关联关系入手进行规定,并记录有元数据	道路网图层组与车道网图层组分别记录了道路几何拓扑网络与车道几何拓扑网络

则的前提下进行数据的自定义,进一步增强了标准的适用性。

3) 拓扑网络。NDS 与道路高精度电子导航地图数据规范直接记录有道路几何拓扑网络与车道几何拓扑网络,并以构建块或图层组的形式对道路与车道的几何信息与拓扑信息进行组织与存储,有利于路径计算的速度与算法的实现,并能有效支持地图匹配、空间分析等功能(朱大奇和颜明重,2010;陈龙等,2018;周鹏等,2018)。

综上,建议在进一步扩展自动驾驶地图数据内容以包含更多相关要素与属性的基础上,采用类似于地图图层分层的方法,将数据模块化组织(应包含几何拓扑网络数据),以提高自动驾驶地图的灵活性与适用性。

2.3 地图渲染

地图渲染用于将地图内容进行可视化呈现。对于标准导航电子地图而言,地图渲染是必要环节,但对于自动驾驶地图而言,各数据标准对地图渲染存

在不同定义。自动驾驶地图数据体量大,因而往往通过深度学习技术在终端层进行感知特征提取与地图要素矢量化,将非结构化的原始数据转化为结构化数据,包括目标对象的位姿、种类和语义等,以便于数据存储与交互(Zhao等,2019;Chen等,2019;Chen等,2020)。矢量化处理的结果往往记录为各对象的几何表达位置与相关属性,而不包括对象的2维或3维可视化数据。

针对数据标准是否需要添加对象可视化数据以支持地图渲染这一问题,存在两种观点:1)部分从业者认为地图渲染在自动驾驶地图中不是必需的,对于自动驾驶汽车等高层次应用而言,地图使用的主体是机器,机器完全可以在无需地图渲染参与的情况下按照现有数据(对象的几何表达位置与相关属性数据等)与机器逻辑行驶;2)另一部分从业者认为地图渲染是自动驾驶地图的重要部分,可以通过地图渲染进一步扩展地图的适用范围。基于这种认知差异,各数据标准对地图渲染的定义也会相应

- **道路网图组:** 用于描述由道路交织而成的交通网络系统, 以支持路径规划
- **车道网图组:** 用于描述由车道交织而成的交通网络系统, 以支持路径规划
- **道路标线图组:** 是对现实世界施划或安装于道路上的各种道路交通标线的记录, 常用于车道级显示、感知、定位和规划
- **道路设施图组:** 用于描述与表达真实世界的各类道路交通设施, 以支持感知、定位、规划和控制
- **临时信息图组:** 用于进行动态数据的接入, 主要包括车辆、行人等高度动态数据, 更新频率快
- **自定义图组:** 用于进行扩展数据的接入, 是基于现有地图数据的补充与修改, 以支持个性化导航、高级可视化渲染等

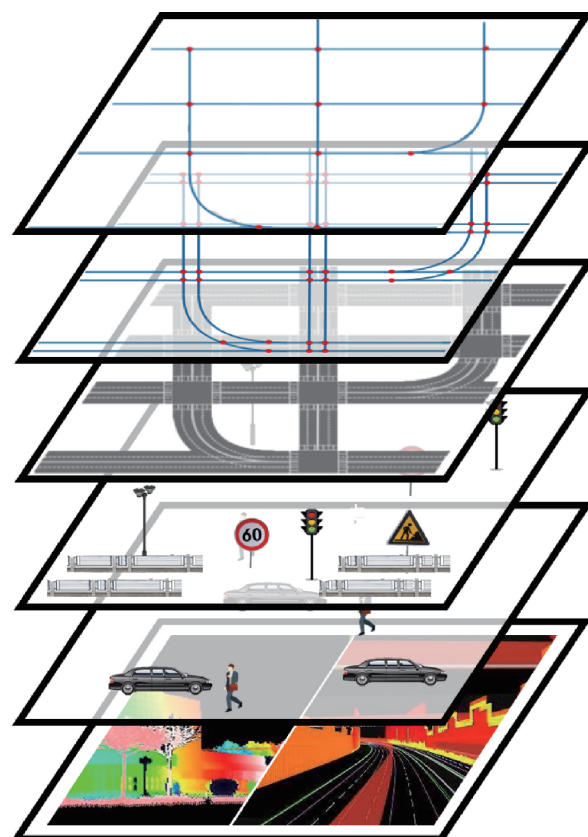


图5 道路高精度电子导航地图图层组分层结构

Fig. 5 Hierarchical structure of road high-precision electronic navigation map

地存在差异。

1) NDS。NDS 提供了一系列构建块以支持地图内容的可视化呈现。在基本地图显示方面, NDS 提供了基本地图显示 (basic map display) 构建块用于绘制 2D 以及 2.5D 地图。在高级地图显示方面, NDS 提供了数字地面模型 (digital terrain model, DTM) 构建块以数字形式呈现地面、地形或地势; 3D 对象 (3D objects) 构建块用于对现实世界对象进行 3 维建模、正射影像 (orthoimages) 构建块呈现地面的卫星与航空影像。同时, NDS 采用了层级划分策略, 将部分构建模块的导航数据划分为多个层级, 层级越高, 空间尺寸越大, 所包含的数据内容越小。通过这种层级划分策略, 有效提高了地图显示与长距离路径计算的效率。

2) OpenDrive。OpenDrive 可以基于参考线 (reference line) 进行地图绘制。参考线是 OpenDrive 中一条重要的几何线, 沿着参考线可以定义道路的内容与属性, 例如道路几何 (road geometry)、高程剖面 (elevation profile)、横向剖面 (lateral profile)、车道组 (lane section)、道路对象 (road object) 和道路标记

(road signal) 等, 进而构造路网。通过渲染以 2 维或 3 维的形式展示给用户。

3) 智能运输系统智能驾驶电子地图数据模型与交换格式。标准仅记录了对对象的几何表达位置, 未涉及地图渲染相关内容。

4) 道路高精度电子导航地图数据规范。标准支持基础地图渲染与高阶地图渲染。在基础地图渲染方面, 标准定义了地图符号的绘制要求、扩充原则以及地图符号库的构建要求, 结合对象相关属性 (如地理位置信息、道路长度和车道宽度) 进行 2 维地图绘制。在高阶地图渲染方面, 标准提供了高级地图信息以支持应用程序进行 2.5D 或 3D 的可视化呈现, 高级地图信息包括空间序列 (对象几何表达位置的形状点的经纬度与高程)、抽样点序列 (记录部分高级车道信息, 包括点的横坡、纵坡、曲率、航向信息)、高程等级和相对高度等。

除智能运输系统智能驾驶电子地图数据模型与交换格式外, 其余三者均定义了地图渲染相关要求, 以支持地图内容的可视化呈现。NDS 还采用了层级划分策略将部分地图数据划分为多个层级。

未来自动驾驶地图将是面向人机共用环境的, 既需满足人类识图的需要, 又能满足机器理解的要求, 适用于高级驾驶辅助系统、高级自动驾驶汽车、机器人导航和国土资源规划等多种应用。因而, 建议地图数据标准应当包含地图渲染方面的内容, 并支持层次化地图显示, 以提高地图显示与路径计算效率。

2.4 协同应用

面向人类驾驶员、用于道路级导航的标准导航地图经过多年发展具备相当丰富的道路交通信息(如道路交通规制、道路属性)、地图显示信息(如江河、湖泊和绿地)、POI信息(如学校、加油站和车站)等, 侧重于描述宏观意义上的真实世界。而主要面向机器、用于车道级导航的自动驾驶地图则侧重于描述道路及周边一定范围内的环境状况, 以及车道间的拓扑连接关系, 尽管拥有更加精确的道路与车道几何数据, 但没有标准导航地图丰富的数据内容, 尤其是POI信息的缺失导致导航功能难

以实现(陶璐, 2017)。针对此问题, 建立自动驾驶地图与标准导航地图之间的协同应用关系, 是较优的解决策略。

4种自动驾驶地图数据标准中, OpenDrive未涉及标准导航地图方面的内容。智能运输系统智能驾驶电子地图数据模型与交换格式明确道路对象需与导航地图建立关联关系。NDS明确集成自动驾驶和导航产品(integrated automated driving and navigation product), 除用于高级自动驾驶的构建块之外, 需结合标准导航相关的构建块, 如基础地图显示(basic map display)构建块、兴趣点(POI)构建块、名称(name)构建块, 实现完整的自动驾驶导航功能。道路高精度电子导航地图数据规范明确道路高精度电子导航地图应与标准导航地图建立协同应用关系, 标准导航地图应向道路高精度电子导航地图提供全局路径计算信息, 道路高精度电子导航地图应将全局路径计算信息转换为局部路径计算信息, 并向标准导航地图提供相应反馈信息(参考流程见图6)。

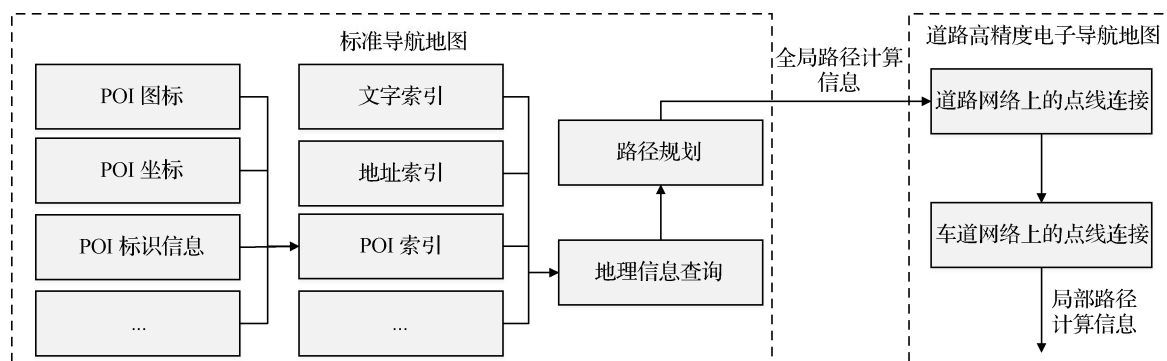


图6 道路高精度电子导航地图与标准导航地图协同应用参考流程

Fig.6 Reference flow of collaborative application between road high-precision electronic navigation map and standard navigation map

自动驾驶地图除与标准导航地图间存在协同应用关系之外, 与自动驾驶应用层开发间也存在一定协同应用关系, 可应用于自动驾驶系统的开发、应用和测试等环节, 支持自动驾驶系统场景理解、视觉定位等功能的实现。通过两者间的协同与交互, 有助于加强数据标准与现实应用之间的一致性, 保证数据标准的可用性。目前由于国内相关数据标准起步较晚, 相关的研究大多集中于 OpenDrive(Xiao 等, 2020)、OpenStreetMap(Sun 等, 2020)等国外相关标准。

综上, 建议在数据标准中明确建立自动驾驶地

图与标准导航地图之间的协同应用关系, 使自动驾驶地图与标准导航地图实现信息互补, 增加两种地图数据的耦合性、交互性, 进而有效应对不同需求。同时, 研究我国的自动驾驶地图与自动驾驶应用层开发间的协同应用关系, 实现两者相互赋能增效。

3 结 语

自动驾驶地图数据标准作为自动驾驶地图生产应用的指导性规范之一, 是自动驾驶地图数据标准化的基准。目前国际上以欧洲为主导, 国内进度相

对滞后。针对此问题,我国相继出台了一系列政策措施,以加快我国自动驾驶地图相关产业的开发与商业化进程,如国家发展和改革委员会等 11 部委联合发布的《智能汽车创新发展战略》明确要构建智能汽车中国标准体系,重点制定车载关键系统、智能汽车基础地图等技术标准和规范,以及“人—车—路—云”系统协同的车用无线通信技术标准和设备接口规范;中共中央、国务院发布《关于构建更加完善的要素市场化配置体制机制的意见》,要求推动车联网领域数据采集标准化;中央政治局常务委员会提出“加快推进国家规划已明确的重大工程和基础设施建设”,“新基建”的实施需围绕车路协同等一系列融合创新应用场景展开,并推动形成具有我国特色的自动驾驶标准体系。

为解决自动驾驶地图数据标准化问题,切实推动我国自动驾驶地图数据标准的制定与完善,同时确保与国外相关进展保持一致,保证我国自动驾驶地图数据标准与国外相关标准的兼容,对自动驾驶地图的数据标准进行比较研究。介绍国内外主流的自动驾驶地图数据标准,针对其中 4 种:NDS、OpenDrive、智能运输系统智能驾驶电子地图数据模型与交换格式和道路高精度电子导航地图数据规范进行分析比较研究,总结出自动驾驶地图数据标准编制时建议遵循的原则,包括:

- 1) 采用数据库技术以表的形式存储数据;
- 2) 采用分层(层次化的逻辑组织模型)分区的数据组织方法;
- 3) 记录更多的要素与属性以反映真实环境状况,并预留动态数据接口与数据扩展接口;
- 4) 支持地图数据模块化组织,记录道路与车道的拓扑几何网络数据;
- 5) 支持地图渲染与层次化地图显示;
- 6) 规定自动驾驶地图与标准导航地图间的协同应用关系;
- 7) 研究自动驾驶地图与自动驾驶应用层开发间的协同应用关系。

这些建议遵循的编制原则对我国相应规格标准的制定具有借鉴意义。

研究主要基于标准文件,较少涉及自动驾驶地图标准与自动驾驶应用层开发间的关联关系。后续将深入研究该方面内容,为自动驾驶地图标准与自动驾驶应用层开发间的相互赋能增效助力。

参考文献 (References)

- Apollo. 2018. Apollo's high precision map analysis[EB/OL]. [2020-07-24]. <https://www.csdn.net/article/a/2018-04-12/15945514>. (Apollo 开发者社区. 2018. Apollo 高精地图解析[EB/OL]. [2020-07-24]). <https://www.csdn.net/article/a/2018-04-12/15945514>
- Bauer S, Alkhorshid Y and Wanielik G. 2016. Using high-definition maps for precise urban vehicle localization//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE: 492-497 [DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795600]
- Bender P, Ziegler J and Stiller C. 2014. Lanelets: efficient map representation for autonomous driving//2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings. Dearborn, USA: IEEE: 420-425 [DOI: 10.1109/IVS.2014.6856487]
- Chen J J, Xiao G, Sheng S E and Gao F. 2007. XML-driven image semantic retrieval system. Journal of Image and Graphics, 12(10): 1770-1773 (陈久军, 肖刚, 盛颂恩, 高飞. 2007. XML 驱动的图像语义检索研究. 中国图象图形学报, 12(10): 1770-1773) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-8961.2007.10.018]
- Chen L, Si Y W, Tian B, Tan Z B and Wang Y T. 2020. Boundary detection of mine drivable area based on 3D LiDAR. Journal of China Coal Society, 45(6): 2140-2146 (陈龙, 司译文, 田滨, 檀祖冰, 王永涛. 2020. 基于 3D LiDAR 的矿山无人驾驶车行驶边界检测. 煤炭学报, 45(6): 2140-2146) [DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0093]
- Chen L, Yu W X, Cao D P, Li L and Wang F Y. 2018. Parallel unmanned system. Unmanned Systems Technology, 1(1): 23-37 (陈龙, 宇文旋, 曹东璞, 李力, 王飞跃. 2018. 平行无人系统. 无人系统技术, 1(1): 23-37)
- Chen L, Zhan W J, Tian W, He Y H and Zou Q. 2019. Deep integration: a multi-label architecture for road scene recognition. IEEE Transactions on Image Processing, 28(10): 4883-4898 [DOI: 10.1109/TIP.2019.2913079]
- Chen L, Wang Q, Lu X K, Cao D P and Wang F Y. 2020. Learning driving models from parallel end-to-end driving dataset. Proceedings of the IEEE, 108(2): 262-273 [DOI: 10.1109/JPROC.2019.2952735]
- Dupuis M, Strobl M and Grezlikowski H. 2010. OpenDRIVE 2010 and beyond-status and future of the de facto standard for the description of road networks//Proceedings of the Driving Simulation-Conference Europe 2010. Paris, France: [s. n.]: 231-242
- Guo C, Guo W F, Cao G Y and Dong H B. 2015. A lane-level LBS system for vehicle network with high-precision BDS/GPS positioning.

- Computational Intelligence and Neuroscience, 2015; #531321 [DOI: 10.1155/2015/531321]
- Haklay M and Weber P. 2008. OpenStreetMap: user-generated street maps. *IEEE Pervasive Computing*, 7(4): 12-18 [DOI: 10.1109/MPRV.2008.80]
- Li K Q, Dai Y F, Li S B and Bian M Y. 2017. State-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicles. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 8(1): 1-14 (李克强, 戴一凡, 李升波, 边明远. 2017. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势. *汽车安全与节能学报*, 8(1): 1-14) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-8484.2017.01.001]
- Li L Y, Li Q Q, Zhao W F and Xu X L. 2009. Research on incremental updating method of navigable electronic maps. *Journal of Image and Graphics*, 14(7): 1238-1244 (李连营, 李清泉, 赵卫锋, 许小兰. 2009. 导航电子地图增量更新方法研究. *中国图象图形学报*, 14(7): 1238-1244) [DOI: 10.11834/jig.20090703]
- Liu J N, Dong Y, Zhan J and Gao K F. 2019a. Thoughts and suggestions on autonomous driving map policy. *Strategic Study of CAE*, 21(3): 92-97 (刘经南, 董杨, 詹骄, 高柯夫. 2019a. 自动驾驶地图有关政策的思考和建议. *中国工程科学*, 21(3): 92-97) [DOI: 10.15302/J-SSCAE-2019.03.004]
- Liu J N, Guo W F, Guo C, Gao K F and Cui J S. 2020. Rethinking ubiquitous mapping in the intelligent age. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 49(4): 403-414 (刘经南, 郭文飞, 郭迟, 高柯夫, 崔竞松. 2020. 智能时代泛在测绘的再思考. *测绘学报*, 49(4): 403-414) [DOI: 10.11947/j. AGCS.2020.20190539]
- Liu J N, Wu H B, Guo C, Zhang H M, Zuo W W and Yang C. 2018. Progress and consideration of high precision road navigation map. *Strategic Study of CAE*, 20(2): 99-105 (刘经南, 吴杭彬, 郭迟, 张宏敏, 左文伟, 羊斌. 2018. 高精度道路导航地图的进展与思考. *中国工程科学*, 20(2): 99-105) [DOI: 10.15302/J-SSCAE-2018.02.015]
- Liu J N, Zhan J, Guo C, Li Y, Wu H B and Huang H. 2019b. Data logic structure and key technologies on intelligent high-precision map. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 48(8): 939-953 (刘经南, 詹骄, 郭迟, 李莹, 吴杭彬, 黄鹤. 2019b. 智能高精地图数据逻辑结构与关键技术. *测绘学报*, 48(8): 939-953) [DOI: 10.11947/j. AGCS.2019.20190125]
- Ma W. 2010. Introduction to KIWI standard and analysis of differences. *China Computer and Communication*, (14): #28 (马威. 2010. GDF、KIWI 标准简介及差异分析. *信息与电脑(理论版)*, (14): #28)
- Navigation Data Standard. 2016. Publishing high-accuracy map standard for companies; industrial consortium pushes autonomous driving [EB/OL]. [2020-07-24]. <https://www.prnewswire.com/news-releases/publishing-high-accuracy-map-standard-for-companies-industrial-consortium-pushes-autonomous-driving-593363311.html>
- Queiroz R, Berger T and Czarniecki K. 2019. GeoScenario: an open DSL for autonomous driving scenario representation//2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Paris, France; IEEE: 287-294 [DOI: 10.1109/IVS.2019.8814107]
- Ren Y H, Liu Y L, Peng L, Xu Q, Wang M and Chi T H. 2015. Research on data standard of indoor maps. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (7): 50-53 (任玉环, 刘亚岚, 彭玲, 许清, 王铭, 池天河. 2015. 室内地图数据标准体系探讨. *测绘通报*, (7): 50-53) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2015.0209]
- Seif G H and Hu X L. 2016. Autonomous driving in the iCity—HD maps as a key challenge of the automotive industry. *Engineering*, 2(2): 159-162 [DOI: 10.1016/J.ENG.2016.02.010]
- Sun C, Vianney J M U, Li Y, Chen L, Li L, Wang F Y, Khajepour A and Cao D P. 2020. Proximity based automatic data annotation for autonomous driving. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 7(2): 395-404 [DOI: 10.1109/JAS.2020.1003033]
- Tao L. 2017. A Study on Road Networks Matching for Highly Automated Driving Map and Traditional Navigation Map. Wuhan: Wuhan University (陶璐. 2017. 高精度自动驾驶地图与传统导航地图路网匹配方法研究. 武汉: 武汉大学)
- Wu M G, Yu F X, Chen T S, Luo Q, Tan S S and Zhang H T. 2011. Sharing method of map symbols based on XML Web services. *Journal of Image and Graphics*, 16(12): 2211-2216 (吴明光, 余粉香, 陈泰生, 骆骥, 檀姗姗, 张弘毅. 2011. 地图符号的 XML Web Services 共享方法. *中国图象图形学报*, 16(12): 2211-2216) [DOI: 10.11834/jig.20111217]
- Xiao Z Y, Yang D G, Wen T P, Jiang K and Yan R D. 2020. Monocular localization with vector HD map (MLVHM): a low-cost method for commercial IVs. *Sensors*, 20(7): #1870 [DOI: 10.3390/S20071870]
- Xu L and Liang F H. 2011. Conception of modular design of thematic map. *China CIO News*, (4): 137-139 (徐琳, 梁发宏. 2011. 专题地图模块化设计构想. *信息系统工程*, (4): 137-139) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-2362.2011.04.054]
- Zhao Z Q, Zheng P, Xu S T and Wu X D. 2019. Object detection with deep learning: a review. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 30(11): 3212-3232 [DOI: 10.1109/TNNLS.2018.2876865]
- Zhou P, Liu X and Tan H. 2018. A method of web 3D GIS spatial data storage and dynamic topology. *Science of Surveying and Mapping*, 43(10): 137-143 (周鹏, 刘星, 谭浩. 2018. 网络三维GIS空间数据存储及动态拓扑方法. *测绘科学*, 43(10): 137-143) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2018.10.022]
- Zhu D Q and Yan M Z. 2010. Survey on technology of mobile robot path planning. *Control and Decision*, 25(7): 961-967 (朱大奇, 颜明重. 2010. 移动机器人路径规划技术综述. *控制与决策*, 25(7): 961-967) [DOI: 10.13195/j.cd.2010.07.4.zhudq.014]

作者简介



詹骄, 1994 年生, 男, 博士研究生, 主要研究方向为高精度地图、计算机视觉。

E-mail: 769553954@ qq. com



郭迟, 通信作者, 男, 教授, 主要研究方向为北斗应用、无人系统导航与位置服务。

E-mail: guochi@ whu. edu. cn

雷婷婷, 女, 本科生, 主要研究方向为高精度地图、计算机视觉。E-mail: 953847325@ qq. com

屈宜琪, 女, 硕士研究生, 主要研究方向为地图制图、交通 GIS 技术。E-mail: 1931998@ tongji. edu. cn

吴杭彬, 男, 副教授, 主要研究方向为激光扫描数据处理、室内地图制图、交通 GIS 技术。E-mail: hb@ tongji. edu. cn

刘经南, 男, 教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为大地测量坐标系理论、卫星定位应用、软件开发和重大工程应用。

E-mail: jnliu@ whu. edu. cn