

公路基础设施三维数字化技术及应用研究

李 阳¹, 黄建鑫², 王维锋²

¹徐州市公路事业发展中心, 江苏 徐州

²河海大学土木与交通学院, 江苏 南京

收稿日期: 2023年2月23日; 录用日期: 2023年3月24日; 发布日期: 2023年3月31日

摘 要

开展三维数字化研究是推动公路高质量发展的基础, 文章结合公路行业实际业务需求, 对比分析BIM建模、车载激光雷达扫描、无人机倾斜摄影等三种公路基础设施三维数字化技术的特点及其适用范围, 设计三维数字化应用系统总体框架, 开发数据服务、三维可视化、资产管理、统计分析、智能巡查、路面病害管理等功能模块, 支撑公路行业数字化转型。

关键词

智慧公路, 公路基础设施, 数字化, 三维, 资产管理

Research on 3D Digitization Technology and Application of Highway Infrastructure

Yang Li¹, Jianxin Huang², Weifeng Wang²

¹Xuzhou Highway Development Center, Xuzhou Jiangsu

²College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu

Received: Feb. 23rd, 2023; accepted: Mar. 24th, 2023; published: Mar. 31st, 2023

Abstract

The study of 3D digitization is the foundation of promoting the high-quality development of highway. Based on the actual business needs of the highway industry, this paper compared the characteristics and application scope of three 3D digitization technologies for highway infrastructure, such as BIM modeling, vehicle-mounted Lidar scanning, and UAV tilt photography. Then, the overall framework of 3D digitization application system was proposed. Finally, the functional modules of the system including data services, 3D visualization, asset management, statistical analysis, intelligent inspection and pavement disease management were developed. This study could support

the digital transformation of the highway industry.

Keywords

Smart Highway, Highway Infrastructure, Digitalization, 3D, Asset Management

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究意义及现状分析

我国正进入智慧公路建设时期,2021年2月,中共中央国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》,要求推进交通基础设施数字化、网联化,利用新技术赋能交通基础设施发展,加强既有交通基础设施提质升级,至2035年交通基础设施数字化率应达到90% [1]。2021年10月,交通运输部印发《数字交通“十四五”发展规划》,要求以数字化、网络化、智能化为主线,以先进信息技术赋能交通运输发展,强化交通数字治理,促进交通高质量发展[2]。目前,我国发达地区已经从大规模公路基础设施建设阶段转向高品质、精细化的运营养护阶段,传统二维数据已无法满足公路基础设施立体形态的管理需求[3]。随着多源数据采集及三维建模技术的快速发展,如何利用三维数字化技术提升公路基础设施的运行管理与养护水平成为业界研究重点。

国外在交通数字化方面的起步较早。2013年,德国将交通建设和城市发展部更名为德国联邦交通和数字化基础设施发展部,并发布了《数字化战略2025》,旨在加快推进数字化基础设施建设。2016年,美国发布了《公路性能监测系统实用手册》,其中详细规定了采集上报、管理分析、应用服务等公路数据应用流程中各阶段的责任主体和相关要求[4],并于2017年发布了《道路元素模型清单2.0》,以各州为主体,规定了37个强制采集的数据元素,目标是支持整个联邦进行统一数据处理和安全决策[5]。2019年,欧洲道路运输研究咨询委员会将数字化基础设施分为五个等级,用于支撑自动驾驶。同年,日本发布了《创造世界最先进的数字国家宣言》,推动交通在内的各领域数字化、智慧化进程。

国内也开展了以GIS技术为基础,与BIM技术进行融合的应用实践,通过对BIM模型数据进行格式转换,实现与三维地理信息平台的无缝结合[6]。同时,利用GIS技术实现对地理空间信息数据和影像数据的管理和服务发布,包括处理、录入、存储点云与等高线等地理信息数据,将三维地形地貌进行还原并生成模型[7]。此外,国内相关单位通过搭载摄像机和激光雷达的检测车或无人机采集公路基础设施要素,为构建“道路全资产管理平台”打下“本底数据”基础[8] [9]。

目前,公路基础设施数字化仍停留在探索阶段,其关键技术与相关应用场景有待进一步研发。在数据感知方面,缺乏针对公路设施全要素的采集技术体系,基础设施数据资源有待完善,需建立标准化的数据采集方法;在技术应用方面,面向智慧公路业务的三维数字化应用场景研究与示范应用尚处于起步阶段,存在业务应用场景单一、系统性不足等问题。因此,本文针对公路基础设施三维数字化技术进行应用研究,为实现公路基础设施精细化管理提供思路。

2. 数字化技术对比研究

对于已存入公路基础数据库中的设施要素数据,一般可通过系统对接的方式直接获取,对于数据库中缺失的数据(特别是三维数据),需要针对三维数字化技术的适配场景,对比分析BIM建模、车载激光

雷达扫描、无人机倾斜摄影等多源空间数据采集技术，进而选择合适的技术采集公路设施要素。各种采集技术的对比分析结果见表 1。

Table 1. Comparison of multiple acquisition methods

表 1. 多种采集方式比选

采集方式 特点	BIM 建模	车载激光雷达扫描	无人机倾斜摄影
外业采集时间	/	较短	较长
内业处理时间	长	较长	长
费用	高	较高	高
展示效果	好	较好	好
适用情况	多用于公路设计与施工阶段，适用于精细化建模，无法反应周围地理环境	数据量庞大，呈现效果正比于点云数量，需进行单体化处理，适合从车载视角采集路面和沿线设施等数据	模型精度高，纹理逼真，真实立体反应现实场景，可控性强，适合从空中视角采集车载雷达盲区的要素数据

BIM 建模技术通过成熟的三维建模软件获取公路设施要素，多用于公路设计与施工阶段，能够对公路工程项目的功能特性及工程设计进行数字化处理，特别适用于对复杂的公路构筑物进行精细化建模，实现其内部结构分析与管理，但是无法反映周围地理环境，如图 1 所示。此外，实际应用表明，建设期的 BIM 数据难以向运营期传递，使得 BIM 在公路全生命周期中的作用受限。



Figure 1. Highway element acquisition based on BIM modeling

图 1. 基于 BIM 建模的公路要素采集

车载激光雷达扫描技术采用卫星定位和组合惯导设备，定位精度可达到厘米级，主要用于采集公路要素表面的深度信息，得到相对完整的空间信息，通过数据处理重构公路要素的三维表面，获得更能反映公路要素几何外形的三维图形。由于汽车作为激光雷达扫描系统的搭载平台，其机动性灵活性有利于对在役公路要素的精细化采集，且车载激光雷达不受供电影响，采集效率高，适合对路面、沿线设施等在汽车行驶路线上的公路元素进行采集，如图 2 所示。但是，激光雷达安装高度和雷达垂直扫描范围对数据采集有影响，因此，车载激光雷达扫描存在视野盲区，不易采集路基边坡与边沟等公路设施要素。



Figure 2. Highway elements acquisition based on vehicle-mounted Lidar scanning

图 2. 基于车载激光雷达扫描的公路要素采集

无人机倾斜摄影技术通过在无人机上搭载微型五镜头航摄仪获取公路实景三维模型。五台相机镜头可同时从垂直和四个倾斜角度采集公路设施数据，结合倾斜摄影自动建模技术获取位置、姿态、以及像素点数据，将数据进行内业处理得到数字正射影像和表面模型，如图 3 所示。无人机倾斜摄影具有操控性强的特点，其采集的公路设施模型精度高，纹理逼真，能够真实立体反应现实场景，在公路沿线复杂环境下，其多个摄影视角可采集到车载雷达盲区的要素数据，如路基边坡与边沟等。



Figure 3. Highway elements acquisition based on UAV tilt photography

图 3. 基于无人机倾斜摄影的公路要素采集

3. 系统设计

3.1. 系统框架

基于上述三维数字化技术采集的数据，开发公路三维基础设施数字化应用系统。系统总体框架包括采集层、支撑层、应用层，如图 4 所示。其中，采集层用于获取公路基础设施三维模型及属性数据，支撑层用于对系统进行后台管理、与外部系统进行数据交互、对三维数据模型进行控制，应用层实现面向用户所需的业务功能。系统采用前后端分离的方式，建立各功能模块之间的高效协作平台，实现数据关联。

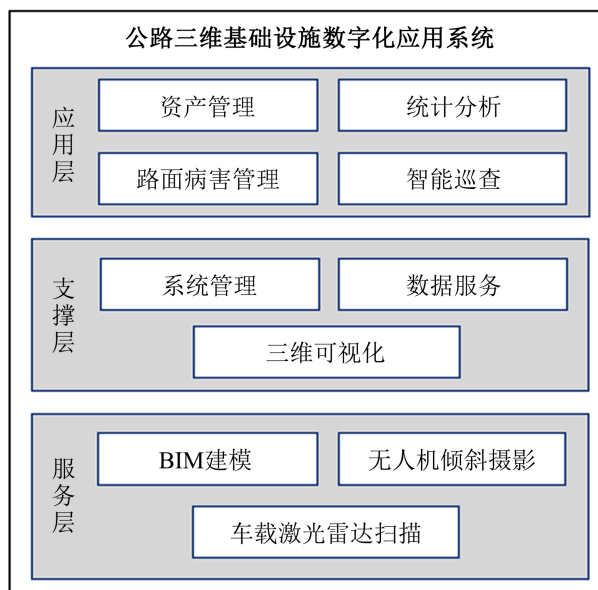


Figure 4. Overall framework

图 4. 总体框架

3.2. 系统功能

1) 三维数据采集及建模

借助 BIM 建模技术生成桥梁、隧道等复杂结构物的三维模型，通过机载激光雷达扫描技术获取公路基础设施三维模型的点云数据与路面病害数据，利用倾斜摄影技术获取公路沿线影像数据，经过空三加密、点云解算、数据融合等处理过程，输出公路基础设施的高精度三维数字模型，并存入公路基础设施三维数据库。其中，激光点云模型与倾斜摄影模型配准是需要实现的关键功能，具体方法如下：

步骤一：模型配准由 6 个参数确定，分别是沿 x 轴、y 轴、z 轴三个方向的平移参数 t_x 、 t_y 、 t_z ，以及绕三个方向的旋转参数 t_α 、 t_β 、 t_θ ；初始化平移参数和旋转参数，使得配准后的激光点云模型和倾斜摄影模型在同一空间坐标系中对齐；

步骤二：根据倾斜影像 P_1 和激光点云 P_2 ，分别计算出倾斜摄影模型的深度图像 X_1 和激光点云模型的深度图像 X_2 ，采用 5 层卷积神经网络，选择已经配准好的 X_1 和 X_2 作为卷积神经网络的输入，并将配准参数 t 作为训练目标对网络进行训练；

步骤三：将 X_1 和 X_2 输入卷积神经网络，由卷积神经网络卷积层提取输入的 X_1 和 X_2 的特征，经过池化层对特征进行降维，再通过全连接层输入到支持向量机回归模型中，通过有限次数的迭代训练(设迭代次数为 k)，使配准误差在可接受阈值范围内，得到训练好的配准卷积神经网络模型；

步骤四：利用训练好的卷积神经网络模型，输入未配准的深度图像，可直接输出预测的配准参数 t_x 、 t_y 、 t_z 、 t_α 、 t_β 、 t_θ 。

融合配准算法可表述为：

- a) Function register (P_1, P_2, k);
- b) $t_{(x,y,z,\alpha,\beta,\theta)} \leftarrow [0]^6$;
- c) $X_1 \leftarrow \text{get depth image } (P_1)$;
- d) for ($i = 1, i \leq k, i++$);
- e) $X_2 \leftarrow \text{get depth image } (\text{transform } (P_2, t))$;

f) $t \leftarrow t + \text{register network}(X_1, X_2) [x, y, z, \alpha, \beta, \theta]$;

g) return t.

2) 系统支撑功能

系统管理：具备角色管理、用户管理、日志管理、数据字典、数据备份等子功能。支持新增管理人员、权限分配、日志登录及操作监控功能，支持维表数据，具备数据备份功能，可按照天、周、月、日的维度选择备份方案。

数据服务：具备数据服务接口功能，可供其他业务应用系统进行数据接入与数据共享。

三维可视化：支持高精度基础设施三维模型在 GIS 上的加载、放大、缩小、漫游、拖动等操作，具备比例尺、测距等工具，支持用户地图框选，通过列表展示该框选区域的所有设施信息。

3) 系统应用功能

资产管理：实现公路设施的增、删、查、改、自动导入与导出等功能；具备权限的用户方可进行操作，否则用户界面不能显示模型信息。

统计分析：对既有设施、新增设施、设施类型等进行统计分析，支持图、表等形式的自动生成、显示、导出、打印。

智能巡查：此功能模块是面向公路业务的应用场景之一，主要将采集车、无人机或手持移动端 App 巡查的结果自动上报至本系统，并对巡查结果进行核查、确认、分析与显示。也可通过设定不同的巡查范围、巡查对象、巡查速度，在系统中的 GIS 地图上对公路沿线设施进行电子巡查，反馈巡查结果。

路面病害管理：此功能模块是面向公路业务的应用场景之一，通过预训练的路面病害检测算法实现数据自动采集，也可直接接入其他业务系统的路面病害数据。可对路面病害的位置、类型、大小等特征进行分类管理、呈现与评估，有助于实现路面科学、精准养护。

部分功能模块的展示界面如图 5 所示。

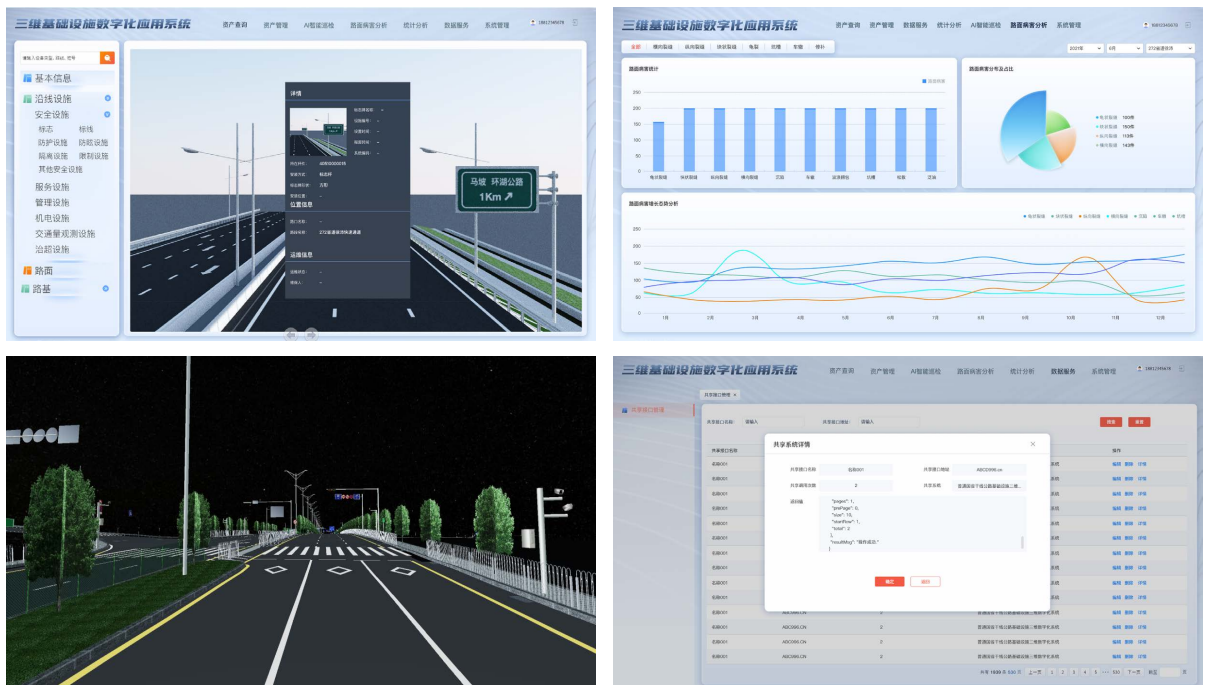


Figure 5. System function display of 3D-digitization highway infrastructure

图 5. 公路三维基础设施数字化应用系统功能展示

4. 结语

运用 BIM 建模、车载激光雷达扫描、无人机倾斜摄影等技术可有效获取公路基础设施三维数据, 针对交通基础设施精细化与可视化管理的需求, 需要选取合适的采集技术适配不同的应用场景并形成技术规范。通过在江苏省公路中的实践应用表明, 本文提出的三维数字化技术能够精准获取沿线设施、路面、桥梁、隧道、涵洞的三维模型及其属性数据, 所开发的应用系统可有效支撑公路资产管理与养护巡检业务, 具有较强的推广应用价值。

由于多种采集技术获取的公路基础设施原始数据量巨大, 如何从海量时空数据中快速加工为应用系统所需的数据, 并从数据中挖掘有价值的信息, 是实现公路基础设施信息轻量化存储及可视化应用的关键, 未来将采用人工智能深度学习方法实现多源数据融合与分析, 利用大数据技术支持超大规模的公路基础设施数据在线处理与场景应用。此外, 由于公路基础设施三维数字化的应用场景众多, 下一步还将结合路网管理、出行服务、养护决策等业务需求进一步拓展系统功能。

参考文献

- [1] 中共中央国务院. 国家综合立体交通网规划纲要(国务院发〔2021〕8号)[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.htm, 2019-02-14
- [2] 中华人民共和国交通运输部. 数字交通“十四五”发展规划(交规划发〔2021〕102号)[EB/OL]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202112/t20211222_3632469.html, 2021-12-22
- [3] 张浩. 公路资产三维数字化管理系统设计与实现[J]. 江苏科技信息, 2022, 39(34): 58-60.
- [4] Jain, N.K., Saini, R.K. and Mittal, P. (2019) A Review on Traffic Monitoring System Techniques. *Soft Computing: Theories and Applications*, 2019, 569-577. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0589-4_53
- [5] Ergunova, O., Skuratov, A., Pozdeeva, O., et al. (2019) Opportunities and Emerging Trends for Digitalization of Russian Economy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 483, 012115. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/483/1/012115>
- [6] 赵海云. 基于 GIS + BIM 交通基础设施智慧管养技术的应用研究[J]. 交通与运输, 2022, 35(S1): 228-234.
- [7] 周志刚. 车载激光扫描技术在道路三维实景模型制作中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(8): 189-192.
- [8] 刘晓东, 刘玲, 杨璇. 无人机数据采集系统在公路养护中的应用展望[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(4): 16-17.
- [9] 杨凯文. 车载激光雷达在公路勘测及 BIM 设计中的应用研究[J]. 现代测绘, 2021, 44(4): 1-6.