

基于GIS+AI的道路养护智能化巡检技术研究

孙立新¹ 芦山¹ 赵春雷^{2*} 乔国胜¹ 程纪敏¹ 王健² 赵久鑫²

1.黑龙江交通发展股份有限公司, 中国·黑龙江 哈尔滨 150040

2.黑龙江路升公路科技开发有限公司, 中国·黑龙江 哈尔滨 150040

摘要: 传统交通道路养护依靠人工经验、运维效率低下、缺少数据支持等弊端而言, 本文主要研究 GIS 以及 AI 技术怎样推动道路养护由数字化转向智能化的过程。创建以 GIS 和 AI 相结合的方式开展智能化巡检工作, 采用北斗高精度定位以及车载移动采集手段来达到对道路病害进行厘米级准确定位并获取多种数据的目的, 并且利用 YOLOv8 和 SORT 算法来对路面病害展开精确识别并持续跟踪, 借助相机投影模型以及 PCI 计算过程, 达成对病害面积的测算和路面状况指数自动评定的任务, 病害检测加权平均 F1-score 为 91.1%, 所有的路段 PCI 评分都是良好及以上的水平。该体系可以实现养护数据可视化、业务数字化调度和绩效精细化管理, 给交通基础设施数字化转型以及养护科学决策提供可行的技术支持和实践借鉴。

关键词: 道路养护; 智能化巡检; 深度学习; YOLOv8; GIS

The Application of GIS+AI in the Digital Transformation of Transportation Infrastructure

Sun Lixin¹, Lu Shan¹, Zhao Chunlei^{2*}, Qiao Guosheng¹, Cheng Jimin¹, Wang Jian², Zhao Jiuxin²

1. Heilongjiang Transportation Development Co., Ltd., China Heilongjiang Harbin 150040

2. Heilongjiang Lusheng Highway Technology Development Co., Ltd., China Heilongjiang Harbin 150040

Abstract: To address the problems of traditional traffic road maintenance, such as reliance on manual experience, low operation and maintenance efficiency, and lack of data support for decision-making, this paper focuses on the innovative applications of GIS and AI technologies in the digital transformation of road maintenance. An integrated intelligent inspection system of GIS+AI is constructed, which combines Beidou high-precision positioning and vehicle-mounted mobile acquisition system to realize centimeter-level positioning of road diseases and multi-source data acquisition. Based on YOLOv8 and SORT algorithms, accurate identification and continuous tracking of pavement diseases are completed. Combined with the camera projection model and PCI calculation process, automated evaluation of disease area measurement and Pavement Condition Index (PCI) is realized. The weighted average F1-score of disease detection reaches 91.1%, and the PCI scores of all road sections are above good level. This system realizes maintenance data visualization, digital business scheduling and refined performance management, providing feasible technical support and practical reference for the digital transformation of transportation infrastructure and scientific decision-making of maintenance.

Keywords: Road maintenance; Intelligent inspection; Deep learning; YOLOv8; GIS

0 引言

交通道路养护情况同国家经济发展、社会发展紧密相关, 同区域核心竞争力的提高和人民生活水平的改善也有直接联系。全球一体化迅速发展的时候, 经过几十年甚至更长时间修建起来的传统交通网就存在了很多深层次的问题, 于是给传统的道路养护方式带来了巨大的变革压力。运维成本不断上升, 道路拥堵越发严重, 交通事故频发, 碳排放量日益增加, 都需要找出解决办法。目前交通领域规划、建设、管理还依靠人工经验和静态数据来完成, 对于越来越复杂的环境和系统危险来说已经不能适应了。在这种情况下, 数据化转型依靠数据作为驱动力慢慢渗透进

交通运输当中, 借助先进的信息技术创建起包含感知互联、数据引领、智能决策在内的现代交通道路养护体系架构^[1-2]。

数字化转型过程就是对企业做全面的重新塑造, 把企业的业务模式、运行流程、战略定位等各种方面融合起来, 充分发掘出数字技术所具有的潜力和机会。这种改变依靠的是先进的信息技术手段, 也就是云计算、大数据分析、人工智能等来达到提高效率、提供新的服务、增强市场竞争力的目的。数字化转型不但是技术上的变革, 更是组织文化重新塑造的过程, 是管理模式改变的过程, 也是商业模式重塑的过程, 牵涉到企业战略规划、人力资源管理、客户关系维护等各方面去寻找并作出相应的改变。经

过这样的过程之后,企业就会明白自己处在数字化的时代当中,并且会对未来所面临的各种挑战和机遇有更加清醒的认识。^[3]核心就是用数字技术创建起一个完整的物理交通基础设施以及它的运行状况的全部动态模拟环境,然后借助数据挖掘、智能算法这些工具来对现实中的系统实施准确的模仿,预测可能会出现哪些问题,并给出相应的改进措施。该方法取得成功的主要原因就是地理信息系统 (GIS) 和人工智能 (AI) 这两种主要技术体系互相配合、互相渗透^[4]。

地理信息系统 (GIS) 是处理空间数据的主要技术平台,给交通道路养护规划和创建赋予了十分关键的时空框架支撑。可以准确地绘制出道路、桥梁、隧道、交通枢纽等主要要素的空间分布情况、几何形状、拓扑关系和周围环境等,已经成了创建数字基础设施的一种主要手段^[5-6]。传统的 GIS 系统对于位置和特征有着较好的表现形式,但是对于因果、趋势这些预测性的分析却无法达成^[7-8]。

本文主要研究的是地理信息系统 (GIS)、人工智能 (AI) 技术怎样实现交通道路养护工作的数字化转型,也就是怎样利用新技术手段来提高交通道路养护工作的效率和质量。首先确定数字化转型的概念和技术架构,然后从 GIS 与 AI 融合应用角度出发,提出一些新的想法,比如智能识别、精确建模、深入分析、辅助决策等,并给出具体的实例来说明这些技术给实际工作带来的效果和价值。^[9-11]把目前各种技术路线的优点、缺点、发展方向全部展示出来,给学术界和工程技术界提供一个可供参考、研究的基础。

1 养护智能化巡检相关内容

1.1 GIS 系统

以北斗高精度定位为基础的道路智慧养护主要基础设施之一,用它来完成对道路病害厘米级的空间定位,并把车载移动测量系统得到的各种感知信息融合起来之后,就形成了一个包含道路以及病害的空间分布特点、几何参数以及拓扑关系等各方面因素在内的综合模型。

1.2 车载移动采集系统

车载移动采集系统把北斗实时 kinematic(RTK) 定位技术和各种传感器融合起来,就可以很快获得有关道路的信息。北斗高精度定位系统依靠 4G 或者 5G 网络传送差分数据,从而达成厘米级三维定位精确度和轨迹计算的效果,它的特性是能够持续地给出位置信息,以此来保证道路几何数据的连续性与完整性。高清线阵相机很快就可以得到图像数据,可以清楚地区分车道线、交通标志和路面病害等,有利于保证道路的安全以及养护的速度。底盘中部的

惯性测量单元 (IMU) 会一直监测到车辆姿态的变化,及时修正由于颠簸、转弯等原因造成的定位误差和传感器漂移等问题,使得到的数据在空间上是一致的、准确的。

2 巡检数据获取与处理

2.1 巡检数据获取

本文用哈大高速公路作为数据基础,主要目的是创建一个包含各种道路病害检测训练数据集,该数据集包含横向裂缝、纵向裂缝、块状裂缝、坑槽、修补这五种常见的病害类型,从而对道路病害有更加准确、全面的认识与分析。在横向裂缝、纵向裂缝、块状裂缝、坑槽和修补这五个路面病害的样本集中,分别有 2349 个、1903 个、1870 个、1265 个和 2675 个样本,总共 10062 个样本被用来训练路面病害检测模型,并对其进行改进。表 1 给出了数据集中各类别的数量统计结果。

表1 数据集类别分布

病害类别	训练集样本数	验证集样本数	测试集样本数	占比
横向裂缝	2349	335	330	14.3%
纵向裂缝	1903	309	295	16.3%
块状裂缝	1870	284	260	15.2%
坑槽	1265	156	180	12.3%
修补	2675	375	340	14%
合计	10062	1459	1405	14.5%

2.2 巡检数据处理

2.2.1 滤波与均衡化

影像预处理部分 (见图 1), 从车载获得的原始图像中选取由于振动、动态模糊、过度曝光等原因造成的质量不好样本,以提高之后分析和应用阶段的数据质量。



图1 数据预处理效果对比

2.2.2 数据增强

训练时用经过前期处理并标注好的数据集做全端训

练,以提高模型性能为目的,使模型可以很好地学习到复杂模式和特征。为了提高模型的泛化能力,在训练过程中使用了多种数据增强的方法,即随机裁剪、亮度调节、对比度调节等来模拟真实的车载拍摄环境下的各种变化情况(见图2)。

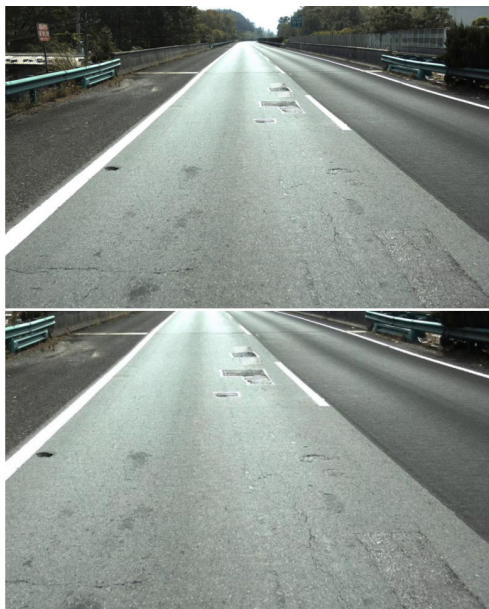


图2 数据增强

2.3 道路病害检测算法

以 YOLOv8 为架构的车辆病害检测模型因为具有检测速度快、识别准确度高、模块化的结构等特点,可以实现对车辆病害的及时发现并作出正确的判断,进而改善自动化诊断系统的运行速度及可靠性。与其整体结构由 Backbone、Neck 和 Head 三部分组成:

骨干部分采用的是经过改良之后的 CSPDarknet 结构,加入了部分连接(Cross Stage Partial Connections),可以加快梯度传递的速度,并且能够提升特征提取的能力,在保持模型准确性的同时大大降低计算量。

Neck 采用的是 PANet(路径聚合网络),把各个层次的特征图结合起来,从而可以识别出大小不一的车辆。

采用解耦检测头(Decoupled Head)的思想将分类任务和边界框回归任务分开处理,可以明显改善模型的训练情况,容易达到收敛状态,在精度和稳定性上都有较大提高。

3 病害识别相关算法

3.1 目标检测算法

(1) 目标检测

本研究选用 YOLOv8 架构作为车辆病害检测模型的基础,其核心特性与项目需求高度契合:可以很好地解决

道路环境中的各种大小的目标检测问题,并且可以克服由于背景干扰(阴影效应、裂缝伪影等)造成的困难。同时也能满足交通应用场合下系统对于实时性的高工程要求。

(2) 目标追踪

在 YOLOv8 精准检测的基础上,本研究引入 SORT(Simple Online and Realtime Tracking)算法完成病害多目标追踪。

3.2 空间坐标转换与测距模型

由于相机成像有透视畸变的特点,因此图像内表现出的病害位置同真实的路面病害实际存在的位置有很大差别。相机空间透视变化计算如式(1)所示:

$$\lambda \begin{bmatrix} \mu \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K[Rt] \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:

λ : 尺度因子,等于物点在相机坐标系中的深度 Z_c

K : 相机内参矩阵, $K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & a_0 \\ 0 & f_y & b_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, f_x 、 f_y 为焦距, u_0 、 v_0 为主点坐标

R 、 t : 相机外参,表示世界坐标系到相机坐标系的旋转与平移

u 、 v : 像点在图像坐标系中的像素坐标

$[X_w, Y_w, Z_w]$: 物点在世界坐标系中的三维坐标

经过对相机的焦距、主点坐标、畸变参数等各个方面的成像因素做精确校正之后,就可以得到像素坐标到地理坐标的对应关系,进而把像素坐标转换成世界坐标。这一步给后面的病害面积计算打下了基础,用图像像素区域和真实的路面面积建立对应关系,保证了后面分析的正确可靠。

对透视变换基本原理做详细的分析,从而达到有效消除图像失真的目的,使得像素坐标系和真实的地面物理尺寸一一对应起来,为之后的高精度病害区面积评定打下基础。

3.3 基于图像的病害面积测算流程

在病害检测与追踪后,使用相机投影几何关系和空间透视变换原理,根据相机参数与车辆姿态信息,将病害的像素坐标转换为实际的地面坐标。病害实际面积计算如式(2)所示:

$$A_{\text{real}} = \text{Scale}^2 \times A_{\text{pixel}} \quad (2)$$

其中:

A_{real} : 病害的实际面积 (m^2)

A_{pixel} : 病害在图像中的像素面积 (pixels)

Scale: 像素与实际距离的比例系数 ($m/pixel$), 由相机内参和拍摄高度决定

本技术方案不需要另外配置测距仪, 安装方便快捷, 计算精确可靠, 可以对监测区域内各种病害面积做出及时评价, 给道路养护工作安排给予有效数据支撑和决策参照。

3.4 PCI 计算流程

按照公路技术状况评定标准 (JTGH01), PCI (路面状况指数) 是通过一定的方法来计算得出的, 把路面破损种类、破损严重程度、破损分布密度等各种情况都考虑进去。

基本计算公式如式 (3) 所示:

$$PCI = 100 - 20 \times \sum (D_{s_i}) \tag{3}$$

其中:

DS_i : 病害 i 的破损密度

病害密度 = (病害面积 / 检测单元面积) $\times$ 100%

3.4.1 单项病害扣分值计算

不同病害类型和严重程度对应不同的扣分值:

(1) 裂缝类病害

轻微: 扣分值 = 裂缝长度 (m) $\times$ 0.4

中等: 扣分值 = 裂缝长度 (m) $\times$ 0.7

严重: 扣分值 = 裂缝长度 (m) $\times$ 1.0

(2) 表面损坏类病害

轻微: 扣分值 = 病害面积 (m^2) $\times$ 15

中等: 扣分值 = 病害面积 (m^2) $\times$ 25

严重: 扣分值 = 病害面积 (m^2) $\times$ 35

3.4.2 综合评分计算

PCI 分值范围: 0-100

$PCI \geq 90$: 优

$80 \leq PCI < 90$: 良

$70 \leq PCI < 80$: 中等

$60 \leq PCI < 70$: 次

$PCI < 60$: 差

3.4.3 本系统自动化计算流程

(1) 病害检测: YOLOv8 模型输出病害类别、位置和像素面积。

(2) 面积转换: 使用公式 $Areal = Scale^2 \times A_{pixel}$ 计算实际面积。

(3) 扣分计算: 根据病害类型和面积查找扣分标准。

(4) PCI 汇总: 加权求和得到最终 PCI 分值。

4 GIS+AI 在道路养护方面的应用

4.1 AI 路面病害识别与 PCI 评估

4.1.1 路面相关病害识别

从表 2、图 3 可以看出, 本文建立的模型对五种路面病害有较好的识别效果, 加权平均精确率为 93.5%, 召回率为 88.9%, F1-score 为 91.1%。另外, 在一定的条件下, 该模型对于找到的病害种类所占的比例最大, 并且平均精度 ($mAP@0.5$) 最高, 达到了 91.2%。经过对各种道路缺陷检测结果进行分析可知, 坑槽检测最好, F1 值为 94.1%, mAP 为 94.8%, 但是坑槽的平均面积很小, 只有 0.45 平方米。块状裂缝检测效果不好, F1 分数为 88.8%, mAP 为 89.5%, 并且它的平均面积比坑槽大很多, 达到 3.5 平方米。横向裂缝和纵向裂缝检测准确率差不多, 但是修补类病害的召回率比其他类型的低一点。

表2 路面相关病害检测效果

病害类别	Precision	Recall	F1-score	mAP@0.5	平均面积 (m^2)
横向裂缝	94.2%	90.5%	92.3%	93.1%	2.3
纵向裂缝	93.1%	89.8%	91.4%	92.0%	1.8
块状裂缝	91.5%	86.2%	88.8%	89.5%	3.5
坑槽	95.3%	92.9%	94.1%	94.8%	0.45
修补	92.8%	88.5%	90.6%	91.3%	1.2
加权平均	93.5%	88.9%	91.1%	91.2%	—

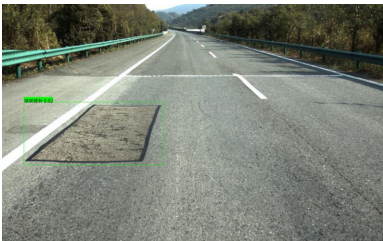


图3 路面病害识别

4.1.2 PCI 评估

结合《公路技术状况评定标准》JTGH0, 基于病害检测数据、面积测算结果及 PCI 计算流程, 对测试路段不同病害类型路段的 PCI 分值进行自动化评估, 所有路段均确保 PCI 分值在良好及以上, 具体结果如下表 3 所示:

表3 PCI评估

病害类别	平均病害面积 (m^2)	病害密度 (%)	单项扣分值	综合PCI 分值	路况等级	病害类别
横向裂缝	2.3	0.35	0.92	93.0	优	横向裂缝
纵向裂缝	1.8	0.28	0.72	94.4	优	纵向裂缝
块状裂缝	3.5	0.22	1.40	95.6	优	块状裂缝
坑槽	0.45	0.15	6.75	97.0	优	坑槽
修补	1.2	0.18	18.00	96.4	优	修补
多病害混合	—	0.25	—	82.3	良	—

5 结语

(1) 本文创建了用 GIS 和 AI 相结合的道路养护智能巡查技术体系,把北斗系统高精度定位的功能同车载移动采集设备结合起来,就可以实现对道路病害厘米级精确的空间定位,而且可以迅速获取各种各样的数据。

(2) 采用 YOLOv8 和 SORT 算法相结合的方法对道路病害进行准确的识别,并且可以持续地跟踪下去,利用相机投影模型得到病害区面积的精确测量和 PCI 参数的自动评定。该种综合方案可以大大提高病害检测的准确性以及评价结果的可信度。

参考文献:

- [1] 毛宁,孙伟增,杨运杰等.交通道路养护建设与企业数字化转型——以中国高速铁路为例的实证研究[J].数量经济技术经济研究,2022,39(10):47-67.
- [2] 郑健壮,张嘉旋,邵勇.智能交通系统发展历程与我国数字化转型[J].公路交通技术,2022,38(04):163-171.
- [3] 吴松.数字化转型在轨道交通运营管理中的应用与实践[J].新城建科技,2025,34(06):89-91.
- [4] 王家耀.关于地理信息系统未来发展的思考[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(10):1535-1545.
- [5] 彭文祥.城市轨道交通智慧监护的数字底座构建与应用[J].上海国土资源,2023,44(02):126-133.
- [6] 李玉花,林雨昕,李丹丹.人工智能技术应用如何影响企业创新[J].中国工业经济,2024(10):155-173.
- [7] 宋关福. AI GIS: 地理智慧的融合之道[J]. 软件和集成电路,2021(04):34-39.
- [8] 潘峰. 基于 GIS 的道路交通事故预测系统研究[D]. 电子科技大学,2010.
- [9] 李明亮. 基于 GIS 与 AI 技术深度融合的大数据监督治理平台研发与应用[J]. 测绘与空间地理信息,2026,49(S1):177-179+182.
- [10] Obaidat T M ,Alomari D L .Real-time multi-source AI, computer vision, and GIS fusion for data-driven urban traffic management[J].Transportation Research Interdisciplinary Perspectives,2026,36101895-101895.
- [11] Christofi D ,Mettas C ,Evagorou E , et al.A Review of Open Remote Sensing Data with GIS, AI, and UAV Support for Shoreline Detection and Coastal Erosion Monitoring[J]. Applied Sciences,2025,15(9):4771-4771.

作者简介:孙立新(1975.01-),男,黑龙江省巴彦县人,本科,研究方向:信息技术。

* 通讯作者:赵春雷(1981.07-),男,黑龙江省佳木斯市人,硕士,高级工程师,研究方向:智慧交通。