

基于探地雷达的大跨桥梁病害检测识别方法

王子青，韩智强，卓亚娟，公君
太原科技大学，山西 太原 030024

摘要：由于现有探地雷达技术未在桥梁病害检测领域使用，且现有的探地雷达技术存在的效率低下及应对复杂病害检测难度大的问题，无法满足大跨桥梁病害实时检测效率低下，以及实时检测的问题，提出了一种创新的基于探地雷达的智能检测方案。该方法使用探地雷达采集数据集照片，在基于 YOLOv8n 模型，建立深度学习模型对其进行训练和评估，检测和识别大跨桥梁病害，并将其部署到轻量化车载设备上，正确率达到 88.9%，能够满足检测的要求。

关键词：探地雷达；深度学习；YOLOv8n；模型部署

Detection and Identification Method of Large-span Bridge Diseases Based on Ground Penetrating Radar

Wang Ziqing, Han Zhiqiang, Zhuo Yajuan, Gong Jun
Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024

Abstract : Due to the fact that existing ground-penetrating radar technology has not been used in the field of bridge disease detection, and the current ground-penetrating radar technology has issues with low efficiency and difficulty in detecting complex diseases, which cannot meet the requirements for real-time detection efficiency of large-span bridge diseases, an innovative intelligent detection scheme based on ground-penetrating radar is proposed. This method uses ground-penetrating radar to collect dataset photos, establishes a deep learning model based on the YOLOv8n model for training and evaluation, detects and identifies large-span bridge diseases, and deploys it on lightweight vehicle-mounted equipment, achieving an accuracy rate of 88.9%, which meets the detection requirements.

Keywords : ground-penetrating radar; deep learning; YOLOv8n; model deployment

引言

大跨桥梁作为现代交通系统的重要组成部分，其结构健康与安全性直接关系到交通流畅、人民生命财产安全以及社会经济的稳定发展。然而，随着桥梁使用年限的增长，以及环境因素、交通荷载等多种因素的综合作用，桥梁结构病害问题日益凸显，这些问题不仅影响桥梁的正常使用，还可能引发严重的安全事故。

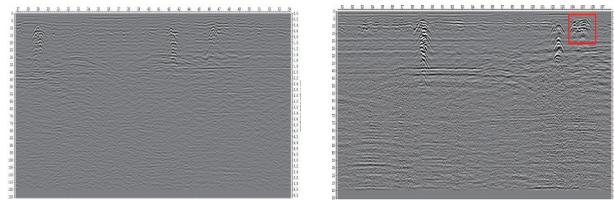
传统的桥梁病害检测方法多依赖于人工巡检和钻孔取芯等破坏性检测手段，这些方法不仅效率低下，且难以全面、准确地反映桥梁内部结构的真实状态。因此，寻求一种高效、无损、准确的桥梁病害检测方法显得尤为重要。探地雷达（Ground Penetrating Radar, GPR）作为一种高效的无损探测方法，具有检测精度高、穿透性强和技术成熟等优势，而且易于与人工智能等数据处理技术相结合，已在地下目标勘探、道路桥梁质检和考古研究等领域展现出卓越的应用价值^[1]。GPR 利用电磁波在不同介质中传播和反射的物理特性来探测地下目标，其检测过程是 GPR 向地下发射高频电磁波，并接收从不同电磁属性界面反射回来的信号^[2-5]。探地雷达作为一种先进的地球物理探测技术，因其具有无损、快速、直观并能显示内部结构状态的特点，在桥梁病害检测领域逐渐崭露头角^[6-10]。探地雷达通过发射高频电磁脉冲，利用不同介质之间的电性参数差异，根据反射波的成像结果来判断病害位置，其检测深度、分辨率和准确性均能满足大跨桥梁病害检测的需求。

本文将围绕基于探地雷达的大跨桥梁病害检测识别方法展开研究，旨在探讨探地雷达在桥梁病害检测中的应用原理、技术特点、检测方法以及实际应用效果。通过对不同病害类型的雷达图像特征的对比分析，建立病害识别模型^[11-12]，为桥梁病害的快速、准确检测提供一种新的思路和方法。基于探地雷达的大跨桥梁病害检测识别方法不仅有助于提高桥梁病害检测的效率和准确性，还为桥梁的维护管理、加固修复以及安全保障提供了有力的技术支撑。因此，开展本研究具有重要的理论意义和实际应用价值。

一、大跨桥梁病害检测方法

(一) 桥梁病害检测概述

设计了一种轻量化车载雷达大跨桥梁病害检测设备，首先将探地雷达设备安装在车辆上，在车辆行驶的过程中，获取桥面病害图像如图1所示，使用labelme进行人工标记；最后建立深度学习模型对其进行训练和评估，对桥梁病害进行检测和识别。



> 图1 基于雷达检测的桥梁病害照片

(二) YOLOv8n模型

YOLOv8 算法在很大程度上汲取了 YOLOv5、YOLOv6 等先前模型的设计精髓，虽然其本身的突破性创新相对有限，但更加注重于工程实践中的实用性与效率。具体而言，YOLOv8 在以下方面展现了其独特性：

(1) 在主干网络 (Backbone) 方面，YOLOv8 同样采纳了 CSP (Cross Stage Partial Networks) 模块的设计理念，但并未止步于此。它巧妙地将 YOLOv5 中的 C3 模块替换为 C2f 模块，这一改动旨在进一步降低模型的复杂度与计算量，从而实现更为出色的轻量化效果。与此同时，YOLOv8 还保留了 YOLOv5 中的 SPPF (Spatial Pyramid Pooling – Fast) 模块，该模块以其高效的特征提取能力而著称，有助于提升模型的检测精度与泛化能力。并对不同尺度的模型进行精心微调，大幅提升了模型性能。

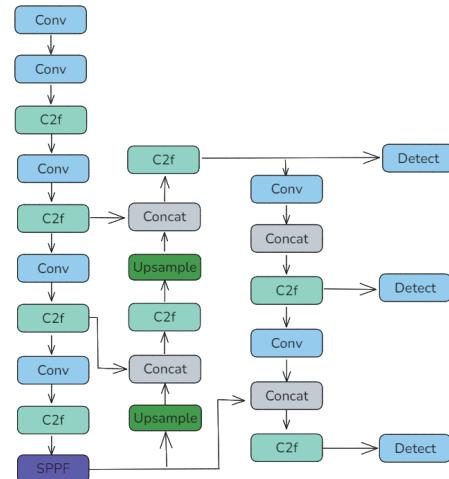
(2) 在特征融合网络 (Neck) 部分，YOLOv8 继续沿用了 PAN (Path Aggregation Network) 的先进理念，旨在通过有效的特征融合策略来提升目标检测的性能。然而，与 YOLOv5 相比，YOLOv8 在结构设计上做出了一项显著的调整。如图 2 所示的结构对比图清晰地展示了这一点：YOLOv8 移除了原本存在于 YOLOv5 中的 1×1 降采样层。

(3) 在 YOLOv8 的预测头部 (Head) 设计中，该算法引入了显著的革新。它采纳了当前主流的解耦头结构，这一结构巧妙地实现了分类任务与检测任务的分离。更为重要的是，YOLOv8 摈弃了传统的 Anchor-Based 方法，转而采用了 Anchor-Free 设计。这一转变不仅优化了模型的性能，还极大地提升了其灵活性，使得 YOLOv8 在应对各种复杂场景时能够表现出更为出色的目标检测能力。

其网络结构框架图如图 2 所示。输入图像首先经过 Backbone 部分进行特征提取，其中的 SPPF 采用了三个相同大小池化 Kernel 的并行 + 串行的结构，增加了更多的跳跃连接，同时保持了相同的感受野，但减少了浮点运算量，提高了速度。提取的特征在 Neck 部分进行融合，以增强特征的表达能力。融合后的特征被送入 Head 部分进行最终的分类和回归预测。

二、一种轻量化车载桥梁病害数据获取设备

设计了一种轻量化车载桥梁病害数据获取设备，在能够全



> 图2 基本模型图

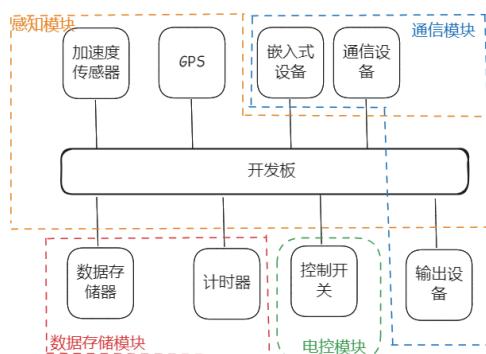
面、准确地收集大跨桥梁数据前提下，保证装置的轻量化、成本造价低与稳定性。本装置主要由感知模块、数据存储模块、通信模块、电控模块 4 部分组成如图 3 所示。

(1) 感知模块。感知模块集成了多种传感器与摄像头技术，具体包括加速度计、全球定位系统 (GPS) 以及前后摄像头。其中，加速度计负责监测并记录车辆在行驶过程中沿三个轴向的加速度变动情况；GPS 系统用于精确定位车辆，帮助记录发现的桥面病害的具体位置。而前后摄像头则负责捕捉道路表面的图像信息。

(2) 数据存储模块。数据存储模块由计时器和数据存储器两部分构成。计时器负责记录加速度计传感器和 GPS 传感器获取数据的时间点，它将这些时间标记用于将传感器数据与 GPS 定位数据进行时间上的同步与空间上的关联，从而能够确定传感器数据采集时的精确位置。数据存储器则负责存储加速度计传感器的数据，包括测量值、记录的时刻以及对应的位置坐标信息。

(3) 通信模块。通信模块集成了嵌入式计算机、通信接口装置以及输出设备。嵌入式计算机作为核心，负责控制整个装置的运行状态，监视其工作情况，并对收集到的数据进行处理与封装。而通信接口装置与输出设备则协同工作，将来自传感器的数据以及检测到的路面病害信息，通过合适的通信渠道安全、高效地传回服务器。

(4) 控制模块。控制模块负责为整个装置供应电力并实现控制功能。



> 图3 车载装置结构图

三、实验结果与分析

(一) 数据采样

探地雷达技术是一种利用高频电磁波进行地下结构探测的无损检测技术。它通过发射电磁波并接收其在地下介质中传播后的反射波，来分析地下结构的性质和位置。当电磁波遇到介质特性变化的界面时，会产生反射，通过分析这些反射信号的时间延迟、振幅和频率等参数。使用探地雷达在大跨桥梁采集病害数据集，约1210张病害照片，按照7:2:1的比例划分训练集、验证集和测试集。

(二) 试验结果与分析

试验使用 AP、mAP、精确率 (P)、召回率 (R) 和 F1 对模型检测效果进行评估，计算公式为：

$$\text{precision} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP}) \quad (1)$$

$$\text{recall} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN}) \quad (2)$$

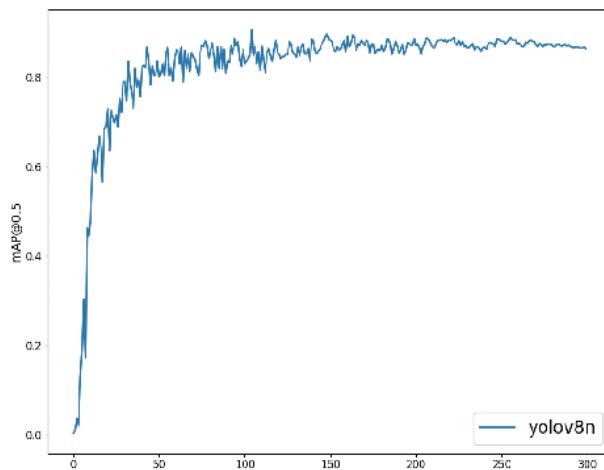
$$F_1 = 2 \times \frac{\text{precision} \times \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}} \quad (3)$$

式中，TP 为真正例；FN 为假负例；FP 为假正例；TN 为真负例。

AP 为检测出该种病害的面积占真实标记面积百分比的平均值；mAP 为所有病害类型 AP 的平均值；F1 越接近 1，代表模型识别效果越好。

YOLOv8 模型网络训练的 mAP 如图 4 所示，在前 50 轮的训练中快速上升，在 50 后，mAP 值逐渐趋于平稳，此时模型已可用于

大跨桥梁病害检测，其准确率、召回率和平均精度达到 85.3%，87.9% 和 88.9%。



> 图 4 mAP 结果图

四、结语

本文设计了一种轻量化车载雷达桥梁病害数据获取设备，并提出了基于轻量化车载雷达的大跨桥梁病害检测方法。在车辆行驶的过程中，收集桥梁病害的图像数据，根据实际情况中的桥梁病害进行实际人工标注，建立深度学习模型对桥梁病害进行检测和识别。使用 YOLOv8n 法搭建深度学习模型，相关研究成果能够满足桥梁日常巡检的要求。

参考文献

- [1] Liu W, Luo R, Xiao M, et al. Intelligent detection of hidden distresses in asphalt pavement based on GPR and deep learning algorithm [J]. Construction and Building Materials, 2024, 416: 135089.
- [2] 孙兆霖, 杨璐, 马跃飞, 等. 基于 GPR 和 PAUT 的混凝土叠合板无损检测方法研究 [J]. 振动与冲击, 2024, 43(20): 318-324+342. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2024.20.034.
- [3] 侯斐斐, 张智轩, 崔广炎, 等. DETR-MCA: 基于探地雷达图像的隧道衬砌内部缺陷的智能检测算法 [J/OL]. 铁道科学与工程学报, 1-12[2024-10-16].
- [4] 王惠琴, 罗佳, 何永强, 等. 改进 YOLOv5 的探地雷达常见地下管线识别 [J]. 地球物理学报, 2024, 67(09): 3588-3604.
- [5] 金泽楷, 张欣怡, 邹新羽, 等. 基于 CNN 的 GPR 图像公路路面层下层界面自动识别研究 [J]. 科技与创新, 2024, (16): 14-18+24.
- [6] 曾宏, 汪新凯, 梁值欢, 等. 地质雷达和超声波综合法在桥墩结构检测中的应用 [J]. 广西水利水电, 2024, (03): 6-9.
- [7] 刘财, 商耀达, 鹿琪, 等. GPR 信号去噪的变分模态分解 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(03): 1042-1053.
- [8] Zhu J, Zhao D, Luo X. Evaluating the optimised YOLO-based defect detection method for subsurface diagnosis with ground penetrating radar [J]. Road Materials and Pavement Design, 2024, 25(1): 186-203.
- [9] Richards E, Stuefer S, Rangel R C, et al. An evaluation of GPR monitoring methods on varying river ice conditions: A case study in Alaska [J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 210: 103819.
- [10] Wang X, Wang P, Zhang X, et al. Target electromagnetic detection method in underground environment: A review [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(14): 13835-13852.
- [11] 王惠琴, 杨发东, 何永强, 等. 面向探地雷达常见地下目标的 GDS-YOLOv8n 检测方法 [J]. 雷达学报, 2024.
- [12] 侯斐斐, 彭应昊, 董健, 等. 基于双重 YOLOv8-pose 模型的探地雷达双曲线关键点检测与目标定位 [J]. 电子与信息学报, 1-12. 2014.