

基于探地雷达的路基无损检测技术研究

庞扬扬, 袁克阔*, 杨莎莎, 李 瑜

西京学院, 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2023年4月24日; 录用日期: 2023年5月14日; 发布日期: 2023年5月29日

摘 要

随着城市地下空间资源的开发力度日益增大, 地层不均匀沉降等城市道路灾害频发, 路面坍塌的主要原因是路基中存在空洞病害, 因此对地下空洞的有效探测尤为重要。探地雷达是目前路基无损检测的一种较为成熟的装置, 但采集得到的探地雷达图像并非直接成像, 很大程度上依赖数据处理人员的经验水平, 使得数据解释耗时且容易误差增大。本文针对路基中空洞的检测问题, 对二三维探地雷达分别进行阐述和对比, 在三维探地雷达的基础之上提出了探地雷达和多种方法联合的无损检测技术。该技术可通过深度学习、机器学习和注意力融合等多种方法对探地雷达采集到的图像数据进行处理, 实现对路基空洞的准确识别, 从而形成精确、可靠、高效的路基健康检测技术。

关键词

路基路面, 无损检测, 地下空洞, 探地雷达

Research on Non-Destructive Testing Technology for Roadbed Based on Ground Penetrating Radar

Yangyang Pang, Kekuo Yuan*, Shasha Yang, Yu Li

Shaanxi Provincial Key Laboratory of Concrete Structure Safety and Durability, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Apr. 24th, 2023; accepted: May 14th, 2023; published: May 29th, 2023

Abstract

With the increasing development of urban underground space resources and the frequent occurrence of urban road disasters such as uneven settlement of the ground, the main reason for road

*通讯作者。

collapse is the existence of cavity diseases in the roadbed, so the effective detection of underground cavities is particularly important. Ground penetrating radar (GPR) is a relatively mature device for nondestructive testing of roadbed at present. However, the collected GPR images are not directly imaged and largely depend on the experience level of data processing personnel, making data interpretation time-consuming and prone to increased errors. In this paper, aiming at the detection of voids in roadbed, two and three dimensional ground penetrating radars are described and compared, and a non-destructive detection technology based on three-dimensional ground penetrating radars and multiple methods is proposed. This technology can process image data collected by ground penetrating radar through multiple methods such as deep learning, machine learning, and attention fusion to achieve accurate recognition of roadbed voids, thereby forming an accurate, reliable, and efficient roadbed health detection technology.

Keywords

Roadbed and Pavement, Non-Destructive Testing, Underground Cavity, Ground Penetrating Radar

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. 引言

探地雷达是一种通过发射高频电磁波来获取被测目标信息的探测装置[1] [2]。本文将提出基于探地雷达与多种方法联合的路基健康检测技术，该技术可大大提高对路基健康的检测效率。空洞病害在异常等级划分中列为第 IV 级，对应最高危害等级，道路路基健康检测的关键是道路地下空洞的判别，其中以空洞为代表的道路病害问题最为显著[3]。地下空洞探测的方法有很多，例如钻孔取芯法、外观判断法、声振检测法、贝克曼梁弯沉法、落锤式弯沉仪截距法、高密度电阻率法、瞬变电磁法、地震面波勘探法等，以上方法在空洞探测中都取得了较好的效果。但以上传统的检测方法存在成本高、检测用时长、效率低和易对路基路面造成损伤的问题。而通过探地雷达对路基状况进行检测的无损检测技术相对于传统的方法具有安全、高效的优势。该技术对路基健康状况检测方法的发展具有一定的积极作用。

探地雷达是近年来发展起来一种探测地下目标的有效手段，该装置在工程探测领域发挥着十分重要的作用。探地雷达法是利用高频无线电电磁波来确定介质内部物质分布规律的一种地球物理方法，具有高精度、高效率等特点，主要用于勘察地下石油、天然气等能源、灾害地质调查以及军事目标探测等多个领域，因此可将探地雷达应用于路基健康检测中的空洞探测。

探地雷达主要分二维探地雷达和三维探地雷达，以下对两种不同维度的雷达分别介绍。

2. 二维探地雷达

2.1. 基本概述

二维探地雷达由主机、发射机、接收机以及收发天线四部分组成的，其工作原理是通过发射天线发射高频电磁波至地下，由于地下介质的不同导致介质系数和介电系数都大为不同从而使得高频电磁波反射后的反射波振幅和相位不同，接收天线随后再对反射波进行收集。在高频电磁波的发射和收集过程二维探地雷达具有一对收发天线用于信息的采集工作。再对已收集数据的预处理和正式处理，最后得出空洞的病害情况。

在数据的处理方面可采用反演技术和成像技术对空洞的实际环境进行三维成像，但是二维探地雷达由于仅有一对收发天线则会导致收集的数据具有不连续性从而只能实现局部的三维成像，因此在实际勘测工程中二维探地雷达的应用较少。

2.2. 二维探地雷达与其他无损检测技术的对比

除探地雷达之外 SSP 地震散射技术对地下病害的检测也具有无损、快速和高效的性质，但是两者在探测的对象和适用性方面有一定差异。以下将通过两种检测方法对地下管道的位置探测实验进行对比分析[4] [5]。

在西安市某郊区对埋深较浅管道进行探测，该管道直径 350 mm，埋深 1.2 m。管道的材料采用的是地下常用的管道 PVC，探地雷达对相对里程 10~17 m 进行探测。探地雷达在扫描之前要对扫描区域进行检查避免土中含有螺钉之类的金属，因为在探地雷达扫描过程中，金属的存在会对雷达信号造成干扰。由于探测的深度，如表 1 所示雷达扫描采用低频的屏蔽天线，对于实验中的天线极化，天线的长轴沿 PVC 管垂直布置，采样中心频率为 100 MHz，时间为 60 纳秒，天线间距为 0.15 m。在扫描过程中通过干扰噪声抑制和信号矫正与增强提高数据的精准性，处理后的探地雷达图像数据利用卷积神经网络(CNN)反演出探测目标和探测环境的特征参数，最后分析得出探地雷达剖面图如图 1 所示[6]。

Table 1. Performance parameters of ground penetrating radar under various antennas

表 1. 各种天线探地雷达性能参数

天线类型	频率类型	中心频率	最小尺寸特征值/m	探测深度(干燥)/m	探测深度(湿润)/m
屏蔽天线	高频	>1.5 GHz	<0.01	<0.8	<0.5
		900 MHz	0.01	0.5~1.5	0.5~1.0
	中频	600 MHz	0.04	2.0~3.0	1.0~1.5
		400 MHz	0.05	3.0~4.0	1.5~3.0
屏蔽天线	低频	200 MHz	0.1	4.0~8.0	2.0~4.0
		100 MHz	0.5	10~15	5~10
		<50 MHz	>1	>20	>10
双频天线	中/高频自由	200~1.5G	0.01~0.1	0.1~8.0	0.1~4.0
	组合	任意两种组合			
全极化天线	中/高频全覆盖	200~1.5G	0.01~0.1	0.1~8.0	0.1~4.0
	覆盖	最多 8 通道组合			

地震散射勘探采用 32 道地震仪，采用中间观测采集的方式。其中检波器拖缆道间距 0.5 m，炮点间距 1 m。此次采集一条测线共 18 炮，合计 17 m。数据采集后生成 SSP 散射地震偏移图像，该图像是对散射强度即反射系数的成像，是空间域的地质结构图像。图像中横坐标为里程，纵坐标为深度。图像中

红色为正散射，表示下层波阻抗相对升高，蓝色为负散射，表示下层波阻抗相对降低。散射强度越大，界面波阻抗差异就越大[7]。因此对横切管道进行探测，再经过数据的处理生成得到生成 SSP 散射地震偏移图像，但通过分析发现在相对里程 11~14 m 埋深 0~1 m 处存在低速异常区，表示管道埋藏深度低于 1 m。而实际管道埋于地下一米以下明显与现场埋深不符。

从探地雷达剖面图中可看出在地下埋深 1.1 m 时电磁波呈现异相，电磁波与周围土层介质不同发生反射，表示管道埋藏深度约 1.1 m 更近似于实际埋深。两者结果对比探地雷达的探测结果较为贴近真实数据值。

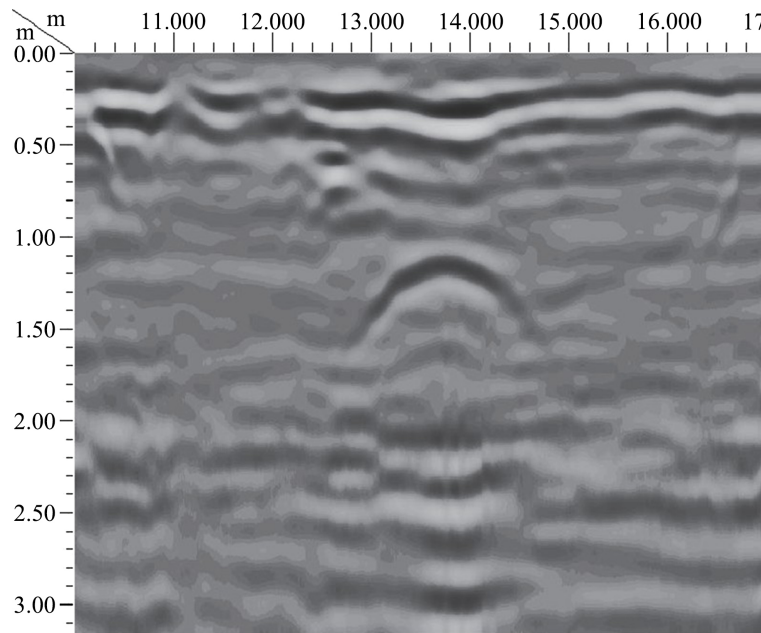


Figure 1. Ground penetrating radar profile
图 1. 探地雷达剖面图

由以上实验可得对于埋深较浅的管道基于探地雷达的无损检测技术更为精确，同理可得对于埋深较浅空洞的探测使用探地雷达进行探测得出的数据结果更为精确。

3. 三维探地雷达

3.1. 基本概述

三维探地雷达工作原理同二维探地雷达一样通过发射高频电磁波对不同介质中的信息进行收集。探地雷达系统由上机位、主控板、采集板和阵列式收发天线组成[8]。与二维探地雷达不同的是三维探地雷达的收发天线使用了阵列式，其中通过采集板和阵列式收发天线组成三维探地雷达的信息采集系统。每个雷达拥有四块采集板且每个采集板对应着四个天线，因此一个雷达拥有十六个天线，可对里程范围内的路基进行连续性的精准检测，大大降低了采集过程中数据的遗漏。在整个系统中上机位为检测工作的核心负责对后续装置下达指令，并且在数据收集后进行汇总。主控板在整个系统中为中介作用，主要用于将上机位的收集指令传达给采集板以及在接收天线收集之后将采集系统获得的数据上传给上机位。

在探地雷达对反射波进行采集上传之后，探地雷达图像数据的分析需要大量的专业知识，很大程度上依赖数据处理人员的经验水平，使得数据处理分析工作不仅耗时，且难以保证探测结果的准确性。因

此需将探地雷达与多种方法联合进行探测,从而实现检测工作的智能化提高工作的效率。以下将对探地雷达的采集方式以及雷达与各方法的联合探测分别进行介绍。

3.2. 数据采集方法

三维探地雷达中应用最广泛的采集方式是剖面法[9]和宽角法[10],这两种采集方法都属于反射式采集方法。剖面法中接收天线和发射天线保持固定距离,接受天线随着发射天线沿着测线进行移动收集,这样使得反射波的数据具有时效性和直观性。同时剖面法的单次收集具有一定的误差因此需要反复沿测线进行移动收集提高数据信噪比。宽角法与剖面法不同的是将发射天线固定,接收天线沿着发射天线两侧反向进行移动检测。宽角法双向检测可以提高扫描效率,同时通过反复的扫描收集可以提高采集数据信噪比。宽角法与剖面法的测量方法移动方向如图2所示。

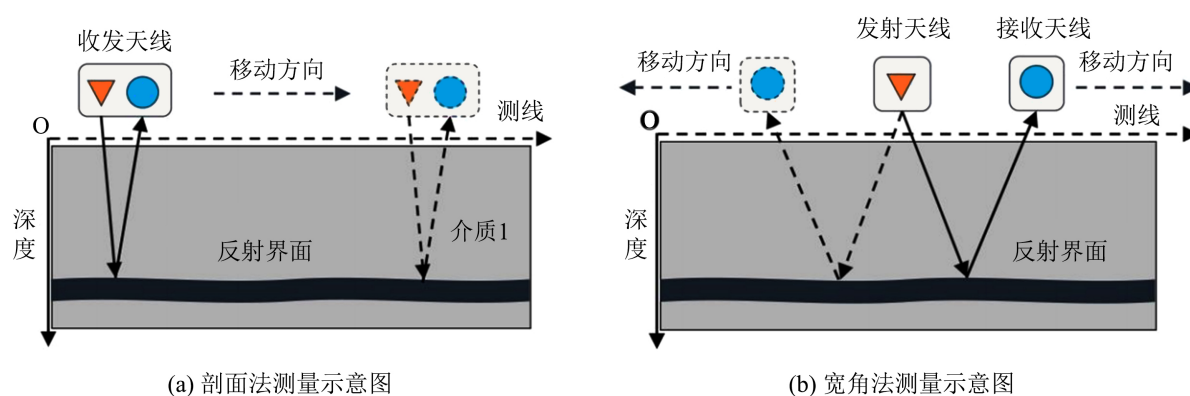


Figure 2. Schematic diagram of ground penetrating radar measurement method (Suo Mingkang, 2021)

图2. 探地雷达测量方式示意图(索明康, 2021)

3.3. 探地雷达与多种方法联合的无损检测技术

3.3.1. 深度学习和探地雷达的联合

该联合方法是一种基于探地雷达和深度学习的无损检测技术。首先,使用探地雷达技术对空洞进行探测,获取路基图像数据,再对以上图像数据进行去噪、信号增强等预处理,最后结合CNN对处理后的图像数据进行反演[11]。最终达到准确识别路基空洞的目的。

本文中深度学习和探地雷达的无损检测技术检测是利用探地雷达利用剖面法和宽角法对地下空洞的反射波数据进行收集获取图像数据。再通过降噪和增强信号等手段对图像数据进行预处理,最后将数据输入卷积神经网络中对数据进行正式处理从而得出空洞的病害情况。

随着无损检测技术不断发展,通过图像识别技术对地下空洞病害情况进行实际还原为主流,从而使检测过程更为直观。其中浅层次结构模型和深层次结构模型,而深层次模型相对于浅层次模型在数据的提取方面更足以满足探测需求,而深层次模型对应的就是深度学习技术[12]。其中卷积神经网络(CNN)在深度学习网络模型中最为成熟,具有卷积层[13]、池化层[14]和多连接层多层次结构,同时卷积神经网络在深度学习技术的数据处理中起核心作用[15]。

在数据的预处理方法方面,采用干扰噪声抑制和信号矫正与增强两个手段。高频电磁波在探测过程中对环境的要求较高,由于探地雷达进行数据采集后,在其回波信号中包含着大量干扰信号,如直达波、反射波等。因此,在对信号解释之前,需对探地雷达采集到的电磁波信息进行干扰噪声抑制和信号矫正与增强等预处理。

在数据正式处理方面,利用了卷积神经网络(CNN)智能反演技术[16]。当图像数据经过处理之后利用卷积神经网络(CNN)反演出探测目标和探测环境的特征参数,如介电常数、电导率等,获取目标和环境的属性特性。首先将预处理后的图片输入到 CNN 网络后,先经过卷积层生成图像的特征数据,由局部图像的特征信息得到整体的特征信息。再经过池化层是对特征数据进行聚合统计,降低特征映射的维度,减少出现过拟合,如图 3 所示。为了保证数据的精确性会对数据进行反复的卷积池化处理,最后将图片特征送入全连接网络完成路基空洞的准确识别。综上可得,基于探地雷达和深度学习的无损检测技术具备较高的智能性。

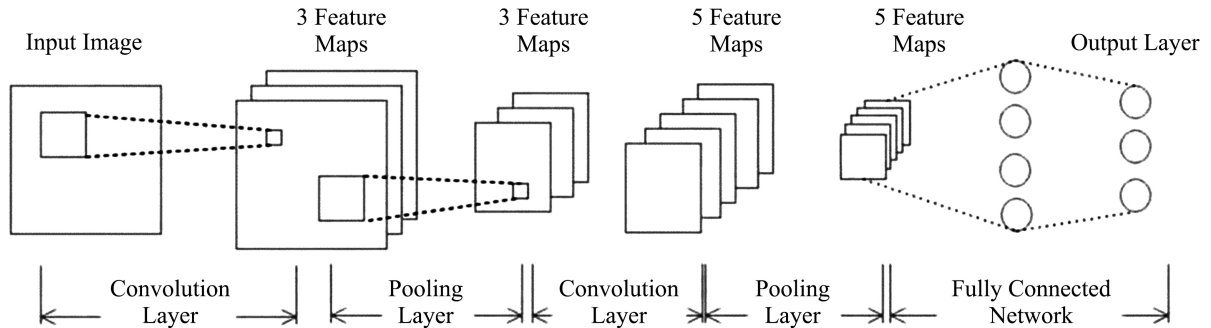


Figure 3. Schematic diagram of CNN network structure

图 3. CNN 网络结构示意图

3.3.2. 机器学习和探地雷达的联合

基于机器学习和探地雷达的无损检测技术是一种通过有效识别算法和机器相结合的检测方式,通过阵列式三维探地雷达系统而实现[17]。当数据经上传后利用 GprMax3D 开源软件对数据进行模拟,再通过基于 GMM-HMM 的地下空洞识别模型对探地雷达数据进行识别[18] [19]。

本方法中探地雷达系统为数据采集系统,由上机位、采集板和主控板构成。上机位的主要作用是对收集数据进行分析,同时从多个维度对探地雷达数据进行展现[8]。采集板为整个探地雷达系统的核心,主要作用是保证发射天线和接受天线之间工作的连续性以及对反射数据进行收集最后再上传至上机位。主控板位于上机位和采集板中间起着传递的作用,主要功能是向下传递上机位的参数指令以及把采集板的收集的反射数据上传给上机位。同时需要用 GprMax3D 软件对数据进行正演[20] [21],其正演模拟流程如图 4,从而生成 B-scan 数据。再通过 MatLab 软件再对 B-scan 数据进一步处理得到 A-scan 和 C-scan 数据。该方法利用 A-scan 数据对范围进行大概的确定最后再利用 C-scan 数据进对空洞进行确定。

基于机器学习和探地雷达的联合方法有效的将探地雷达系统有效识别的算法紧密结合巧妙地应用 A-scan 和 C-scan 数据的优势对空洞进行了精确的识别分析。

3.3.3. 注意力融合的探地雷达

基于注意力融合的探地雷达的无损检测技术相较于传统的人工检测具有自动性和智能性。该系统主要利用三维探地雷达图谱数据将视图特征融合和自注意力机制相结合,实现端对端的对道路进行检测[22]。主要是将信息转换成多视图,通过主视图和俯视图将病害分为空洞、裂缝和层间脱空,其中以主视图为主俯视图为辅。

通过多视图对道路病害进行分析的流程:首先将数据称多视图显示,首先对主视图也就是垂直断面进行分析,当视图呈高亮状态时即可判定道路为空洞病害,若视图纹理呈双曲线将需进一步分析其俯视图也就是水平断面,若为长条状态则判断为裂缝,若俯视图有暗斑或亮斑则判断其为层间脱空。

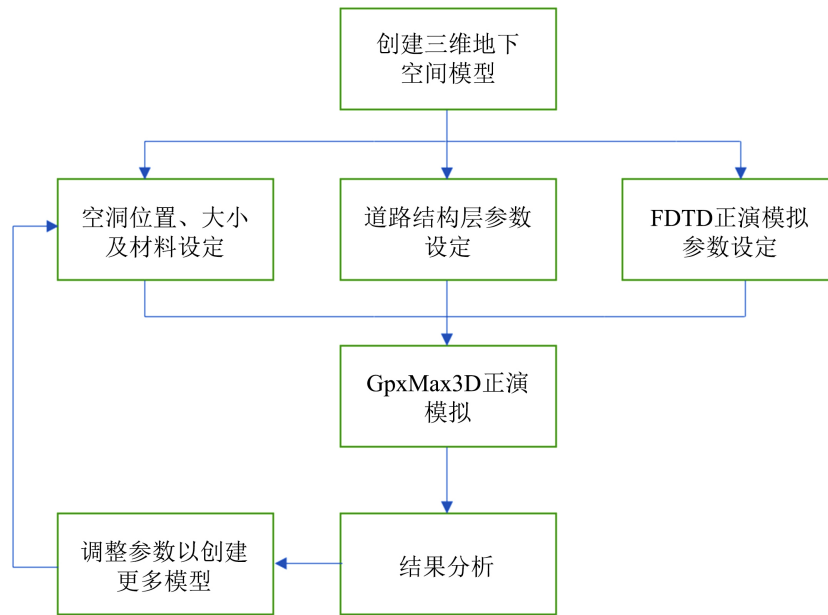


Figure 4. Forward simulation flow chart
图 4. 正演模拟流程图

该方法的主要算法分别由端到端的双塔模型、通道间注意力机制[23]、视图间注意力机制[24]和病害类别预测构成。创新点是两个视图作为数据输出，分别在两个视图上分别设置特征提取器在提取时引入通道间注意力机制学习通道间权重关系，最后通过特征融合实现端到端的分类。注意力融合的探地雷达对空洞的无损检测充分了利用了多视图端到端深度注意力双塔模型，并融入两个视图的权重关系来增强视图的权重值从而提高精度。此方法在雷达图谱数据集上取得了很好的预测效果。

4. 探地雷达的实际应用

通过以上对二维、三维探地雷达的介绍可知各自的基本结构和工作原理。基于探地雷达的无损检测技术主要是通过相关的技术和手段实现对岩土结构是否存在缺陷的检测和分析[25] [26]。相较于传统的检测技术，最大的优势就是安全性和无损性，通过声波技术在对检测对象没有任何损伤风险概率的情况下进行高效精确诊断。本文针对雷达在城市空洞的无损检测方法进行论述。

探地雷达在城市道路的检测过程中是通过天线中心频率来控制深度和分辨率[27]。在现实中当地层自重和外加荷载之和大于地层的强度就易使地面崩塌，因此可通过坍塌拱高度 h 和空洞覆盖层 H 来判定空洞是否对路面造成坍塌危害[28]。

坍塌拱高度 h 的计算公式：

$$h = \frac{a + b \tan(45^\circ - \varphi/2)}{\tan \varphi}$$

式中 h 为地下空洞坍塌拱高度， a 为地下空洞半径， b 为地下空洞高， φ 为地层沙土内摩擦角。计算得出坍塌拱高度之后当 $H \leq h$ 时，路面易产生坍塌， $H > 1.5 h$ 时路面较为安全， $h < H \leq 1.5 h$ 时路面相对安全。

在探测过程中反射波的振幅强度由反射系数 R 决定， R 的计算公式如下：

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}$$

式中 ε_1 为空洞上方土体介电常数, ε_2 为空洞中空气相对介电常数。

虽然二维和三维探地雷达对地下信心数据收集原理相同但是两者又有不同的优缺点。探地雷达的天线决定了雷达的分辨率, 天线中心频率越高, 分辨率越高, 探测深度越小; 天线中心频率越低, 分辨率越低, 探测深度越大[29] [30]。三维探地雷达的天线是阵列式即数量多, 中心频率高导致分辨率高从而使探测的数据精度高于二维探地雷达。但缺点是中心频率高导致探测深度有限, 适合于 0~3 m 较小空洞和裂缝的检测。二维探地雷达由于天线数量较少且收集周期长导致数据在收集过程中会有遗漏从而精度较低, 但中心频率可自由选择使得探测的深度比三维探地雷达高, 适用于 3 m 以上。

5. 结论

本文主要是以道路中的空洞病害为例对探地雷达无损检测技术进行研究。在探地雷达中分为二维和三维两种维度的探地雷达。二维探地雷达虽然具有一定局限性, 但和地震散射技术对比, 发现二维探地雷达相较于地震散射技术更适合浅层次探测, 且精度更高。在三维雷达中由于自身的天线较多, 数据收集周期短且数量大, 使用人工进行分析较为繁琐, 因此将雷达与学习方法进行联合检测。本文列举了深度学习、机器学习以及注意力融合的三维探地雷达无损检测技术, 各种模型通过不同的算法对数据进行分析, 如深度学习卷积神经网络的反演技术、机器学习基于 GprMax3D 软件的正演技术和注意力融合的双塔网络模型。将三维探地雷达和模型算法相结合可大大提高路基健康检测的精度和效率, 减少了人力资源的投入, 促进了检测的智能性, 对路基健康的无损检测技术发展具有积极地推动作用。

最后将探地雷达应用于实际工程中, 在城市道路检测方面介绍了道路塌陷的可能性和地下空洞坍塌拱高度的重要性, 从而更好地说明空洞对路面是否存在威胁。相信探地雷达的无损检测技术在未来的发展中会更好地为道路病害检测服务。

基金项目

西安市科技局高校院所科技人员服务企业项目(22GXFW0148); 陕西省教育厅 2022 年度一般专项科研计划项目(22JK0597); 2022 年省级大学生创新创业训练计划项目(X202212715040)。

参考文献

- [1] Benson, R.C. (1983) Evaluation of Differential Settlement or Collapse Potential. *Proceedings of the 33rd Annual Highway Geology Symposium*, Vol. 22, 241-256.
- [2] Rodeick, C.A. (1984) Roadbed Void Detection by Ground Penetrating Radar. *Highway & Heavy Construction*, **127**, 60-61.
- [3] 曾雄鹰, 王佳龙, 梁晓东, 等. 基于双频高动态探地雷达技术的道路地下病害检测研究[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(5): 2225-2232.
- [4] 陈宗刚, 孟磊, 赵越顺, 等. SSP 地震散射与二维探地雷达在浅埋深地下病害体探测中的对比分析[J]. 工程技术研究, 2021, 6(12): 52-53+242.
- [5] Noshahri, H., van der Meijde, M. and Olde Scholtenhuis, L. (2022) GPR Surveys in Enclosed Underground Sewer Pipe Space. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **129**, Article ID: 104689. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104689>
- [6] 姜璞玉. 基于探地雷达(GPR)地下管道水渗漏监测研究[J]. 地下水, 2022, 44(6): 80-82.
- [7] 周振华. 用 SSP 地振散射技术探测基坑施工对邻近路基的影响[J]. 市政技术, 2021, 39(3): 124-126+130.
- [8] 陈浩. 基于机器学习的探地雷达地下空洞目标图像识别[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [9] 刘国文, 杨修猛, 崔鑫, 等. 地质雷达和视电阻率联合剖面法在地铁勘察中的应用[J]. 都市快轨交通, 2020, 33(1): 104-108.
- [10] 蔡连初, 缪念有. 探地雷达宽角反射图形拟合方法[J]. 物探与化探, 2021, 45(1): 239-244.
- [11] 童峥. 基于深度学习和探地雷达技术的路面结构病害检测研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2018.

- [12] 余凯, 贾磊, 陈雨强, 等. 深度学习的昨天、今天和明天[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(9): 1799-1804.
- [13] 于杭. 基于卷积神经网络的三维探地雷达目标识别方法[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- [14] 王淑栋, 安迪, 庞善臣. 基于图神经网络的多维度池化图分类[J/OL]. 计算机系统应用, 2023: 1-10. <https://doi.org/10.15888/j.cnki.csa.009118>, 2023-03-30.
- [15] 赵勇. 基于 CNN 的探地雷达数据反演与道路病害自动识别[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [16] 窦慧, 张凌茗, 韩峰, 等. 卷积神经网络的可解释性研究综述[J/OL]. 软件学报, 2023: 1-27. <https://doi.org/10.13328/j.cnki.jos.006758>, 2023-03-30.
- [17] 许泽善, 简世凯, 覃谭, 等. 探地雷达在道路脱空空洞病害检测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(1): 116-125.
- [18] Hou, F.F., Liu, X., Fan, X.Y., *et al.* (2022) DL-Aided Underground Cavity Morphology Recognition Based on 3D GPR Data. *Mathematics*, **10**, Article No. 2806. <https://doi.org/10.3390/math10152806>
- [19] Leibowitz, C. and Weiss, A.J. (2022) Underground Cavity Detection through Group Dispersion of a GPR Signal. *Remote Sensing*, **14**, Article No. 4808. <https://doi.org/10.3390/rs14194808>
- [20] 王龙. 基于深度学习和探地雷达三维图像的地下管线识别研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [21] 周皓秋. 基于机器学习的全极化探地雷达地下目标体分类识别[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [22] 韩海航, 莫佳笛, 周春鹏, 等. 基于注意力融合的三维探地雷达道路病害检测[J]. 计算机工程与设计, 2022, 43(9): 2669-2677.
- [23] 李昊璇, 李旭涛. 融合注意力机制的通道拓扑细化改进的图卷积网络[J]. 测试技术学报, 2023(2): 120-126.
- [24] 谢琪琦, 辛月兰, 曾曦. 基于注意力机制的多视图三维重建[J]. 激光杂志, 2023, 44(1): 136-142.
- [25] 张胜森. 无损检测技术在岩土工程中的运用[J]. 工程技术研究, 2020, 5(12): 98-99.
- [26] 申强, 钟伟. 探究岩土无损检测技术的应用[J]. 城市建筑, 2014(6): 156.
- [27] 蔡勤波, 赵增志, 赵亮, 等. 在道路检测中探地雷达天线的选择[J]. 勘察科学技术, 2022(2): 48-53.
- [28] 张杨. 探地雷达在深圳市道路坍塌防治中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [29] 彭仁, 武子荐, 朱鸿章. 城市道路空洞雷达信号传播特征案例分析[J]. 市政技术, 2022, 40(7): 176-180.
- [30] 吴凯彬, 吴杰. 二、三维探地雷达在地面坍塌隐患检测中的综合应用[J]. 中国新技术新产品, 2022(11): 140-142.