doi: 10.11720/wtyht.2023.1161
徐立,冯温雅,姜彦南,等.基于行列方差方法的探地雷达道路数据感兴趣区域自动提取技术[J].物探与化探,2023,47(3):804-809. http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1161
Xu L, Feng W Y, Jiang Y N, et al. A technique for automatically extracting regions of interest from ground penetrating radar data of roads based on the row-column variance method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(3): 804-809. http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1161

基于行列方差方法的探地雷达道路数据感兴趣区域自动提取技术

徐立[1,2],冯温雅[3],姜彦南[1,2],王娇[1,2],朱四新[4],覃紫馨[1,2],李沁璘[1,2],张世田[3]
(1. 桂林电子科技大学 信息与通信学院,广西 桂林 541004;2. 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室,广西 桂林 541000;3. 中国电波传播研究所,山东 青岛 266107;4. 华北水利水电大学 地球科学与工程学院,河南 郑州 450011)

摘 要: 随着经济和社会的快速发展,道路承受的负载急剧增大,使得道路内部逐渐产生一系列的病害。探地雷达(ground penetrating radar, GPR)是一种无损探测技术,可将道路下方目标的回波信息呈现在雷达剖面图上,其中的空洞、脱空、疏松体等病害信息构成了探地雷达道路数据的感兴趣区域(region of interest, ROI)。传统的人工提取 ROI 方法对人员的技术要求高,同时针对海量数据的人工识别给一般人员的精力提出了不小的挑战。为此,本文提出一种通过在行列方差基础上加入阈值分割数据的方法,实现 ROI 的自动提取。实验结果表明,提出的方法有效地提取出多类型、多目标 ROI 位置信息。该方法在提高探地雷达道路检测效率方面具有较大的应用潜力。

关键词: 探地雷达;探地雷达剖面图;行列方差;阈值分割;ROI
中图分类号: P631.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-8918(2023)03-0804-06

0 引言

1904 年,德国人 Hulsmeyer 首次将电磁波信号应用于远距离地面金属体的探测[1]。随后,Letmbach 和 Lowy 将雷达原理应用于地球探测中,正式提出探地雷达(GPR)的概念[2]。GPR 原理是通过向地下发射高频电磁脉冲,并获得目标反射回波信号,以此实现目标异常体探测[3]。GPR 是一种无损探测技术,广泛应用于道路质检与维护、城市管理与规划、军事探测与考古等领域[4-6]。

在道路质检与维护中,GPR 将道路下方的整体信息呈现在二维雷达剖面图上(B-scan),其中的空洞、脱空、疏松体等病害[7]与雨污井、地下管线、线缆等人工构筑物信息统称为探地雷达道路数据的感兴趣区域(region of interest, ROI)。在面对 ROI 提取时,一方面,传统人工识别方法对工作人员的技术提出很高要求,同时面对海量 GPR 探测数据的人工识别与提取给一般人员的精力也提出不小挑战;另一方面,在用于道路质检时,很长的 GPR 剖面中绝大部分区域并不存在异常,人工识别方法提取 ROI 效率低下,经济性差。为此,ROI 自动提取技术在 GPR 数据识别中受到越来越广泛的关注。

随着人工智能方法的快速进步,以 R-CNN、Faster R-CNN、YOLOv3 等为代表的深度学习技术在 ROI 自动化提取与识别方面逐渐展现出较大的应用潜力,但该类技术前期通常依赖庞大且已解释和验证的数据集作为支撑,给其实际应用带来极大障碍[8]。基于 GPR 信号特征的 ROI 自动提取技术具有数据依赖度低的优点,特别适用于解决实际工程问题。刘普等[9]建立包括空洞、脱空等病害的地质建模,分析了其 GPR 信号特征,利用 GPR 数据的行

收稿日期: 2022-04-13; **修回日期:** 2023-03-21
基金项目: 广西自然科学基金项目(2019GXNSFFA245002);电波环境特性及模化技术重点实验室基金项目(202003007);广西无线宽带通信与信号处理重点实验室基金项目(GXKL06200126);桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目(2021YCXB04)
第一作者: 徐立(1994-),男,硕士研究生,研究方向为信号与信息处理。Email:1442510164@qq.com
通讯作者: 姜彦南(1980-),男,博士,教授,研究方向为电磁辐射与散射、探地雷达应用技术等。Email:ynjiang@guet.edu.cn

方差方法初步对 ROI 进行提取,并勾勒出异常目标体位置信息。但是,若一个 GPR 剖面内存在多个目标时,该方法将无法区分具体的目标体。此外,地下管线和钢筋目标在 GPR 剖面上呈现较特殊的双曲线特征,因此这两类目标提取的研究报道较多。例如:张旭等[10]提出先采用 Canny 算子进行边缘检测再提取双曲线的异常目标识别算法得到雷达目标反射图像;Mertens 等[11]通过将双曲函数拟合基于 Canny 滤波器检测的双曲线轮廓边缘点和顶点来识别反射双曲线;Ma 等[12]提出了一种无监督、高效、鲁棒的模式识别算法,自动检测桥面路基中的钢筋。可以发现,根据地下管线、电缆和钢筋等成像特征[13-15]来识别 ROI 可以获得良好性能,但是在实际复杂的道路环境中,除了管线和钢筋异常外,往往会同时存在其他类型的异常,此时采用上述算法效果不佳。

为解决上述问题,本文提出基于行列方差与阈值分割相结合的方法实现 ROI 的自动提取,能够有效地获得 GPR 道路数据 ROI 的位置信息。该方法适用于同一个 GPR 剖面上存在多种异常类型、多个 ROI 目标的情况。

1　本文算法

1.1　算法原理

由概率论和数理统计理论可知,方差可用来度量随机变量和数学期望(即均值)之间的偏离程度,方差越大随机变量的结果越不稳定,易形成突变。通过计算不同变量对总体突变的贡献,可以量化变量突变的影响程度。这里,假设样本数据为 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ (n 为样本数据长度),样本数据方差 S^2 表达式为

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (M - x_i)^2}{n}, \tag{1}$$

其中 M 为样本数据均值,表达式为

$$M = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n}。 \tag{2}$$

在 GPR 的 B-scan 数据中,横坐标和纵坐标分别代表道号和采样点,其中的方差又区分为列方差和行方差。行方差是对每一采样点的 n 道数据做方差处理,而列方差是对每一道的 n 个采样点数据做类似处理。通常情况下,GPR 目标体对应的 ROI 区域内行列方差数值比较大,ROI 区域外行列方差值相对较小甚至为 0。为此,可以在行列方差基础上,引入适当的阈值分割并提取 GPR 的 B-scan 数据中的 ROI。

1.2　计算行列方差分布

以 Matlab 计算环境为例,其中的 Var 函数可计算二维数据方差。假设 x 为探地雷达采集的二维数据,利用式(3)和式(4)可分别计算其行方差数值为 ***x_row*** 和列方差数值 ***x_col***:

$$\boldsymbol{x_row} = \mathrm{var}(x, 1, 2), \tag{3}$$

$$\boldsymbol{x_col} = \mathrm{var}(x, 1, 1), \tag{4}$$

x_row 和 ***x_col*** 分别存储着 x 行列方差值的向量,基于它们可得到 GPR 数据的行列方差分布,从而直观地反映 ROI 的整体情况。

图 1a 是利用中国电波传播研究所 LTD-2100 型号 GPR 链接 GC400 MHz 天线采集的某道路原始数据剖面。可以看出:图中存在两个目标 ROI,分别位于侧向上 350~530、530~700 道和垂向上 110~300、120~350 采样点之间;行列方差情况如图 1b~d 蓝色实线所示。对比行列方差分布与原始剖面图的目标体位置可以判断结果较为吻合。在目标体位置处,无论是行方差还是列方差数值均明显较大,目标外相对较小。

1.3　阈值分割提取 B-scan 数据 ROI

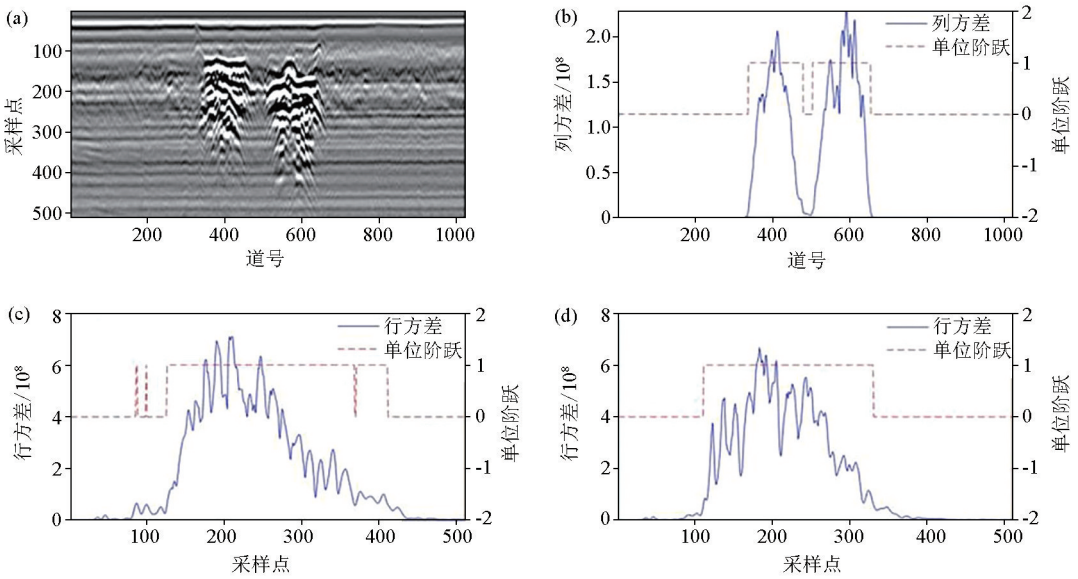
正态分布可以反映随机变量的分布规律。利用 B-scan 原始数据中待识别目标和背景区域方差的差异,正态分布曲线的标准差 σ 可用来对 B-scan 原始数据进行分割处理,获得 ROI。

设 B-scan 原始数据的方差分布为 $g(x,y)$,依据如式(5)所示的准则判定其与标准差(或阈值 σ)的关系并给相应位置处设定 0/1 标识,最终以单位阶跃曲线形式呈现。

$$h(x,y) = \begin{cases} 0 & g(x,y) < \sigma \\ 1 & g(x,y) > \sigma \end{cases}, \tag{5}$$

其中,阈值法的关键是选取能够使目标和背景明显区分的阈值[16],通过原始数据方差分布与阈值对比判定目标位置。

对图 1a 采用阈值判别后的单位阶跃曲线如图 1b~d 红色虚线所示。在 ROI 信息提取时,选择单位阶跃曲线中“1”状态连续的道号组成 ROI 道间区域,将连续道号映射到原始数据,完成对列方差的处理;对行方差采用类似的处理方式,提取 ROI 图像,如图 2 所示。从中我们发现,单一的行方差处理,只能确定目标的“深度”信息,不能获取 ROI 的位置信息;反之,单一的列方差处理,仅能得到 ROI 的位置信息,但不能确定“深度”信息。把二者结合,自动提取 ROI 的完整信息,如图 2b、c 所示。为了直观地呈现 ROI 提取效果,基于 Matlab 环境的 rectangle 函数用矩形框对 ROI 标注,以数值形式给出异常目标的对角位置信息(图 2a 红框位置)。

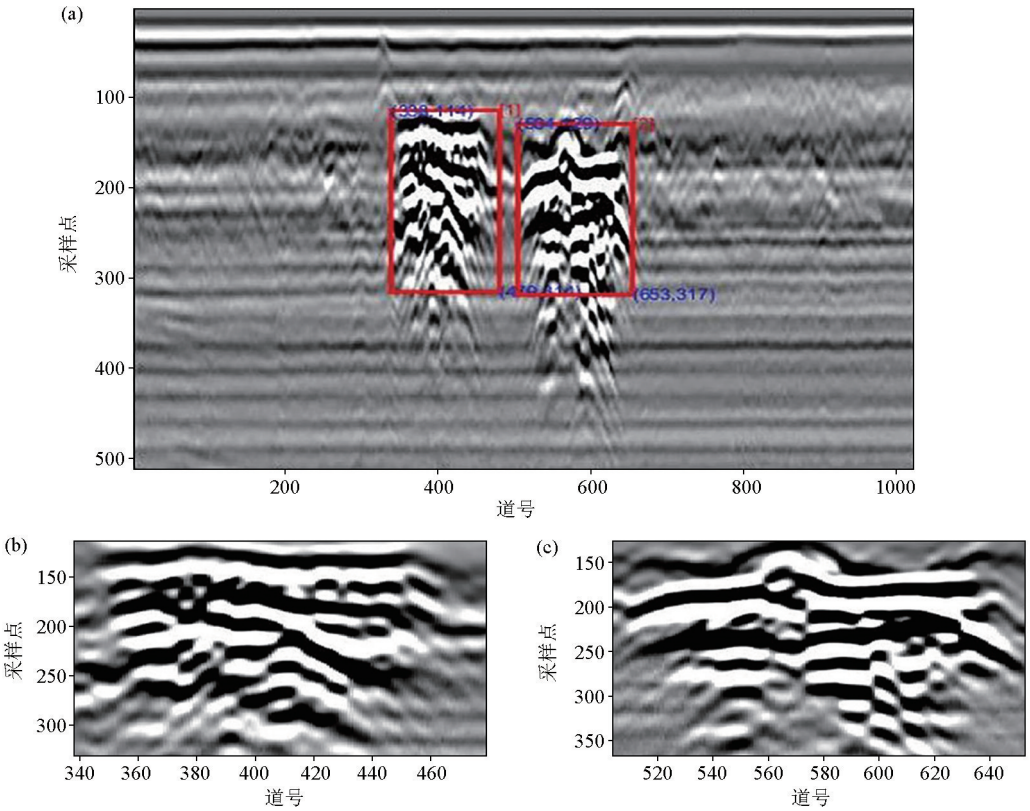


a—原始雷达 B-scan 图像;b—列方差与单位阶跃;c—目标 1 行方差与单位阶跃;d—目标 2 行方差与单位阶跃

a—original radar B-scan image;b—column variance and unit step;c—target 1 line variance and unit step;d—target 2 row variance and unit step

图 1 雷达剖面图及行列方差分布

Fig. 1 Radar profile and row-column variance distribution



a—ROI 标注;b—1 号目标体 ROI;c—2 号目标体 ROI

a—ROI labeling;b—ROI of target No. 1;c—ROI of target No. 2

图 2 行列方差 ROI 提取及标注

Fig. 2 Row-column variance ROI extraction and labeling

1.4 算法实现流程

结合前述分析,本文提出的 ROI 提取算法流程如图 3 所示。提取 ROI 前,需要对原始数据进行预处理,其目的在于滤除原始数据含有干扰 ROI 提取效果的各类噪声。此外,预处理还可以增强目标弱回波信号,有效提高 ROI 提取准确率。

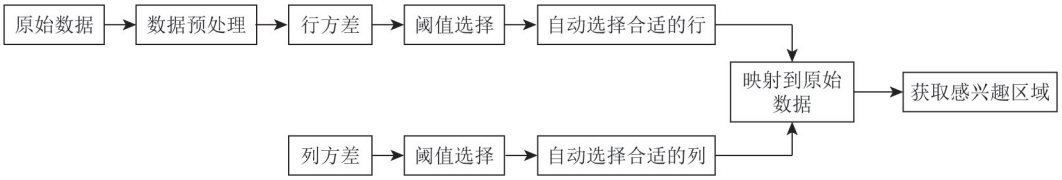


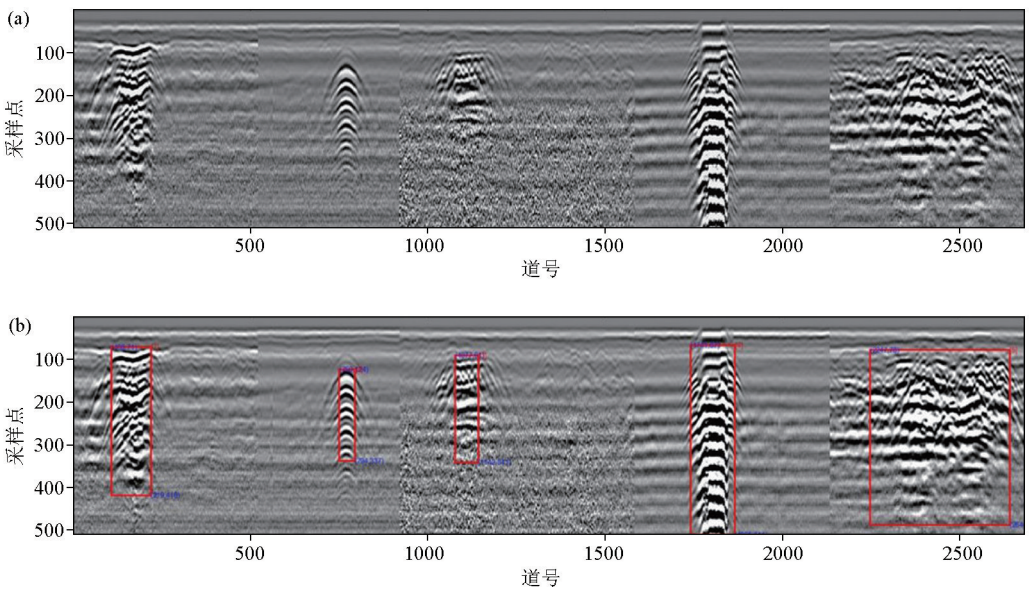
图 3　算法流程

Fig. 3　Flow chart of algorithm

2　算例实现与分析

2.1　多类型、多目标 ROI 提取

依据探地雷达工作方式和工作场景可知,同一 GPR 道路剖面图中可能存在多种类型、多个目标的异常体。因此,为了阐述本文方法的有效性,先把包含不同类型目标的多个 GPR 实测数据进行人工拼接,合成为如图 4a 所示的含有多种类型、多个目标的 GPR“实测剖面”,再结合本文提出的 ROI 自动提取技术对其进行处理,提取效果如图 4b 所示。其中,每个红色矩形框标注的 ROI 对应的信息如表 1 所示。可以看出,本文提出的方法很好地实现了 GPR 道路数据 ROI 的自动提取。



a—雷达 B-scan 原始图像;b—ROI 提取效果

a—radar B-scan original image;b—ROI extraction effect

图 4　存在多目标的 ROI 提取

Fig. 4　ROI extraction with multiple targets

表 1　多类型、多目标及其位置信息

Table 1　Multi-types, multi-targets and their location information

目标类型	目标编号	目标位置
空洞	1	(108,71;219,418)
管线	2	(750,124;794,337)
钢筋网	3	(1077,91;1142,341)
雨污井	4	(1741,67;1865,511)
疏松体	5	(2147,78;2640,487)

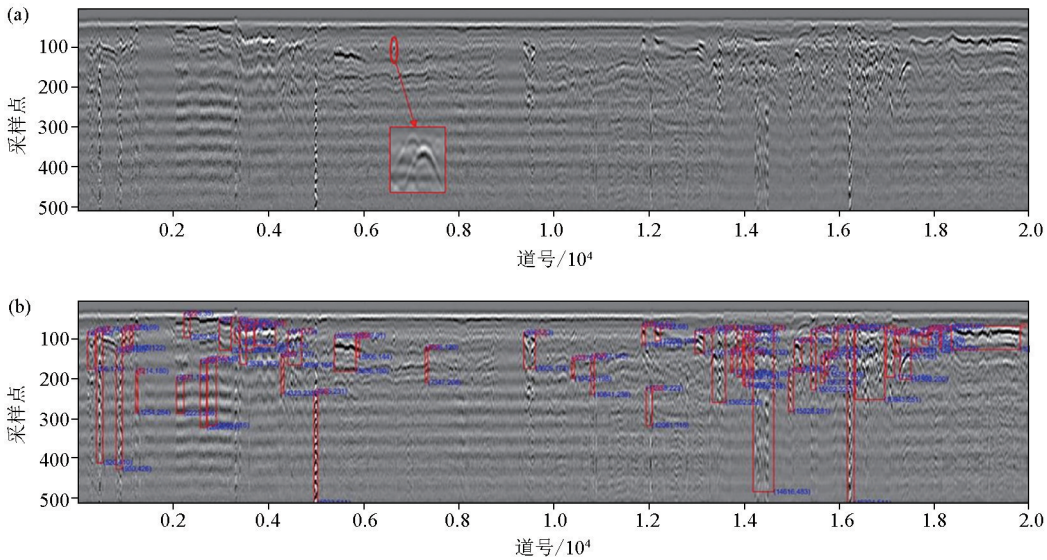
2.2　方法有效性分析

这里对在青岛市江西路采集的 20 000 道实测 GPR 数据进行处理并标注目标区域,结合背靠背测试方法对其分析和验证,即先由专业人工筛查方法标出异常区域,再用本文提出的方法自动提取并标注 ROI,最后以专业人工筛查结果为基准分析自动提取 ROI 的检测率,以进一步阐明提出方法的有效性。检测率 η 可表示为

$$\eta = \frac{T}{T_0} \times 100\% , \tag{6}$$

其中:T_0 是专业人工筛查出来的异常区域总数;T 是本文方法在专业人工筛查出的异常区域中自动提取标注的 ROI 总数。

对江西路实测的 20 000 道 GPR 数据进行 ROI 自动提取并标注(图 5),专业人工筛查和本文方法自动提取结果统计如表 2 所示,异常类型及位置编号如表 3 所示。对比自动提取和人工筛查的结果可以得出,自动提取的目标个数要多于人工筛查的异



a—青岛市江西路 B-scan(插图为自动提取遗漏的 ROI);b—自动提取 ROI

a—B-scan diagram of Jiangxi road, Qingdao(illustration is automatic extraction of missing ROI);b—automatically extracting ROI

图 5 青岛市江西路 B-scan 图及对于提取的 ROI

Fig. 5 B-scan diagram of Jiangxi road in Qingdao and the extracted ROI

表 2 ROI 检测率

Table 2 ROI detection rate

数据量/采样点×道号	T_0	T	η/%
512×20000	24	23	95.8

表 3 ROI 对应目标类型及其自动提取编号

Table 3 Target types corresponding to ROI and their automatic extraction numbers

目标类型	目标编号
空洞、脱空	12, 23, 25, 28, 36, 37, 39, 40, 46
疏松体	3, 17, 29, 31, 35, 38, 43
钢筋网	15, 22
雨污井	2, 18, 42
管线	30, 41

常目标,其主要有 3 个方面的原因:①自动提取把两个距离接近的目标标注为两个 ROI,而人工只做一次标注;②当 GPR 采集方向与管线走向一致时,虽然会产生类似空洞的 ROI 响应,但专业人员不会判定其为异常;③专业人员对不具备异常目标特征反应的区域不予标注。

通过对比人工筛查结果得出 ROI 自动提取检测率高达 95.8%。自动提取方法遗漏的 6 602~6 685 道间异常为管线结构,如图 5a 插图所示。遗漏的主要原因是该目标的行列方差值,低于阈值,尽管如此,本文的自动提取 ROI 方法准确率远高于普通技术人员。并且对图 5a 中病害目标(空洞、脱空、疏松体)的检测率为 100%。

3 结论

本文提出了一种基于行列方差结合阈值分割数据自动提取 ROI 的算法。试验结果表明,本文算法有效地提取了探地雷达道路地下 ROI,同时标记出 ROI 的位置信息。该方法能同时自动提取多种异常类型、多个 ROI 目标,对解决传统人工提取方法存在的技术水平高、工作强度大、检测效率低等问题具有重要的现实意义。

参考文献(References):

[1] Griffiths H, Knott P, Koch W. Christian Hulsmeyer: Invention and demonstration of radar, 1904 [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2019, 34(9): 56-60.

[2] 白冰,周健. 探地雷达测试技术发展概况及其应用现状[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 527-531.
Bai B, Zhou J. Development and application of ground penetrating radar [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 527-531.

[3] 曾昭发,刘四新,冯晅. 探地雷达原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2010.
Zeng Z F, Liu S X, Feng Y. Principle and application of ground penetrating radar [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010.

[4] Baek J, Yoon J S, Lee C M, et al. A case study on detection of subsurface cavities of urban roads using ground-coupled GPR[C]// 2018 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), 2018.

[5] Shi X, Cheng D, Song Z, et al. A real-time method for landmine detection using vehicle array GPR[C] //2018 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), 2018.

[6] Ciampoli L B, Benedetto A, Tosti F. The archaeo track project: Use of ground-penetrating radar for preventive conservation of buried archaeology towards the development of a virtual museum[C]// 2018 Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (MetroAr-

chaeo),2018.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 437-2018 城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People´s Republic of China. JGJ/T 437-2018 Technical Standard for Comprehensive Detection and Risk Assessment of Urban Underground Diseases [S]. Beijing:China Construction Industry Press,2018.

[8] 冯德山,杨子龙. 基于深度学习的隧道衬砌结构物探地雷达图像自动识别[J]. 地球物理学进展,2020,35(4):1552-1556.
Feng D S,Yang Z L. Automatic recognition of GPR image of tunnel lining structure based on deep learning [J]. Progress in Geophysics,2020,35(4):1552-1556.

[9] 刘普,焦良葆,曹雪虹. 基于行方差的 GPR 图像感兴趣区域提取定位方法[J]. 软件导刊,2020,19(6):218-222.
Liu P,Jiao L B,Cao X H. A method of extracting and locating regions of interest in GPR images based on row variance [J]. Software Guide,2020,19(6):218-222.

[10] 张旭,龚钢军,郝建红. 探地雷达目标回波信号双曲线提取算法研究[J]. 计算机测量与控制,2016,24(10):247-250.
Zhang X,Gong G J,Hao J H. Research on hyperbolic extraction algorithm of ground penetrating radar target echo signal [J]. Computer Measurement and Control,2016,24(10):247-250

[11] Mertens L,Persico R,Matera L,et al. Automated detection of reflection Hyperbolas in complex GPR images with no a priori knowledge on the medium[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2016,54:580-596.

[12] Ma X,Liu H,Wang M L,et al. Automatic detection of steel rebar in bridge decks from ground penetrating radar data[J]. Journal of Applied Geophysics,2018,158:93-102.

[13] 林春旭. 基于探地雷达和深度学习的地下目标智能探测与定位方法[D]. 广州:广州大学,2020.
Lin C X. Intelligent detection and location method of underground target based on ground penetrating radar and deep learning [D]. Guangzhou:Guangzhou University,2020.

[14] 张军伟,刘秉峰,李雪,等. 基于 GPRMax2D 的地下管线精细化探测方法[J]. 物探与化探,2019,43(2):435-440.
Zhang J W,Liu B F,Li X,et al. Refined detection method of underground pipeline based on GPRMax2D[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2019,43(2):435-440.

[15] 李靖翔,赵明,赖皓,等. 地下电缆的探地雷达图像特征与识别技术[J]. 物探与化探,2020,44(6):1482-1489.
Li J X,Zhao M,Lai H,et al. Imaging detection and recognition technology of underground cable based on ground penetrating radar [J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2020,44(6):1482-1489.

[16] 吴正平,马占稳,颜华,等. 基于图像的多方向灰度波动局部阈值分割方法[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(6):189-194
Wu Z P,Ma Z W,Yan H,et al. Image-based local threshold segmentation method for multi-directional gray fluctuation [J]. Advances in Laser and Optoelectronics,2020,57(6):189-194

A technique for automatically extracting regions of interest from ground penetrating radar data of roads based on the row-column variance method

XU Li[1,2], FENG Wen-Ya[3], JIANG Yan-Nan[1,2], WANG Jiao[1,2], ZHU Si-Xin[4], QIN Zi-Xin[1,2], LI Qin-Lin[1,2], ZHANG Shi-Tian[3]

(1. *School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin* 541004, *China*; 2. *Guangxi Key Laboratory of Wireless Wideband Communication & Signal Processing, Guilin* 541000, *China*; 3. *China Research Institute of Radio Propagation, Qingdao* 266107, *China*; 4. *College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou* 450011, *China*)

Abstract: With the rapid development of the economy and society, traffic loads have increased sharply, gradually causing a series of pavement diseases. Ground penetrating radar (GPR), which is a non-destructive testing technique, can present the echo information of subsurface targets on the GPR profile. The echo information of diseases, such as voids, cavities underneath the pavement, and loosely infilled voids, constitutes a region of interest(ROI) on the GPR profile. The traditional manual ROI extraction method features high technical requirements and high laborious intensity due to massive data. Therefore, this study proposed an automatic ROI extraction method that combines the threshold segmentation data and the row-column variance. The experimental results show that the method proposed in this study can effectively extract the location information of multi-type and multi-target ROIs. This method has great potential for improving road detection efficiency based on GPR.

Key words: ground penetrating radar; ground penetrating radar profile; row-column variance; threshold segmentation; ROI

(本文编辑:叶佩)