

一种多层融合处理的 GPR B-Scan 双曲线提取方法

蓝雄光¹ 赖 航¹ 周东国² 吴阳杰² 孙新宇¹ 叶 杭¹

(1. 广东电网河源紫金供电局有限责任公司 河源 517400; 2. 武汉大学 电气与自动化学院 武汉 430072)

摘 要: 针对探地雷达 B 扫描(GPR B-Scan)图中双曲线特征自动提取、不规则曲线消除和不完整双曲线拟合等问题,设计了一种多层融合处理的 GPR B-Scan 图像双曲线提取模型。首先,预处理层采用 OTSU 阈值分割算法和形态腐蚀方法预处理图像,然后通过聚类层连接聚类算法完成双曲线特征自动提取,消除不规则曲线,最后双曲线拟合层采用鲁棒正交距离拟合算法,简化双曲线拟合过程。最后先搭建了 GprMaxs 平台仿真实验,平均拟合正确率达到了 97.64%,接着进行了混凝土和潮湿土两个实际工况中真实 GPR B-Scan 图数据实验验证,平均拟合正确率达到 92% 以上。结果表明所设计模型的有效性和正确性,为后续的应用推广奠定基础。

关键词: 探地雷达;多层融合;连接聚类算法;正交距离拟合算法

中图分类号: TP571 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.5

GPR B-Scan hyperbola extraction based on multi-layer fusion processing

Lan Xiongguang¹ Lai Xian¹ Zhou Dongguo² Wu Yangjie² Sun Xinyu¹ Ye Hang¹

(1. Guangdong Power Grid Heyuan Zijin Power Supply Bureau Co., Ltd., Heyuan 517400, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to solve the problems of automatic hyperbolic feature extraction, irregular curve elimination and incomplete hyperbola fitting in the ground penetrating radar B-Scan (GPR B-Scan) image, a multi-layer fusion processing GPR B-Scan image double curve extraction model. First, the preprocessing layer uses the OTSU threshold segmentation algorithm and the morphological corrosion method to preprocess the image, and then through the clustering layer connection clustering algorithm to complete the automatic extraction of hyperbolic features to eliminate irregular curves, and finally the hyperbolic fitting layer uses robust orthogonal the distance fitting algorithm simplifies the hyperbolic fitting process. Finally, this paper first built the GprMaxs platform simulation experiment, the average fitting accuracy rate reached 97.64%, and then carried out the actual GPR B-Scan data experimental verification in the two actual working conditions of concrete and wet soil, the average fitting accuracy rate reached 92% the above. The results show the validity and correctness of the design model in the article, which lays the foundation for subsequent application and promotion.

Keywords: GPR; multi-layer fusion; column-connection clustering; orthogonal-distance fitting

0 引 言

地下电缆是现代城市必不可少的输电线路,早期,在国家大力建设下,许多地下电缆和管道管理并不完善,使得地下管道和电缆的铺设、改道、维护等记录部分信息不全。因此,为了避免在维护和修复过程中损坏地下管道、电缆,在开挖之前估算埋入管道、电缆的位置至关重要^[1-2]。

探地雷达(ground penetrating radar, GPR)因其具有无损且探测速度快等特性而被广泛用于提取浅层地下信息^[3-5]。特别地,在使用 GPR 天线探测有效深度范围内的水平埋管时,因周围介质具有不同的介电常数,使得探地雷

达 B-Scan (GPR B-Scan)图像上会出现双曲线特征^[6],并且可以通过拟合等方法获得相关管道在介质中的位置和大小^[7-8],从而为地下电缆等检测奠定了理论基础。

然而,在实际工况条件下,由于探测土壤介质和埋管之间相互影响的问题^[9],雷达波衍生反射会导致测量到的衍生双曲线而非实际埋管双曲线^[10]。此外,GPR B-Scan 图像会存在大量噪声,增加了图像处理自动提取双曲线的难度^[11]。为此,国内外研究学者在双曲线特征自动提取研究中提出了诸多方法。文献[12]提出了一个基于生成对抗网络(GANs)的深度学习框架,该框架会生成新的训练数据

来解决 GPR 双曲线特征提取问题,通过端到端解决方案自动检测并提取双曲线特征。文献[13]提出了一种行进横断面(MCS)算法,以整合来自多个传感器的单个假设检测,同时使用卡尔曼滤波用于连接假想的管道,以保留所有可能正确的管道。然而,埋入式电缆可能会弯曲以避免损坏其他埋入式管或地下的障碍物,因此按直线段定位埋入式电缆可能会不准确。此外,文献[14]使用 Hough 变换拟合目标参数,并通过在参数空间中投票来确定目标参数,从而提取双曲线。在此基础上,文献[15]提出了一种检测 GPR 图像中的边缘拟合算法,由于边缘拟合对噪声敏感,因此仅适用于较为干净的 GPR 图像。而文献[16]提出了改进型的边缘检测方法以应用于更为复杂的 GPR 图像边缘检测。文献[17-18]提出了一种隐马尔可夫算法与多示例学习框架融合模型,实现双曲线特征提取,并采用贝叶斯方法拟合双曲线参数。考虑到拟合过程仍然存在不规则线段、不完整的双曲线和回波双曲线混叠等问题,因此,上述方法仍然值得进一步优化。

本文提出一种融合图像预处理层、双曲线特征聚类层和双曲线拟合层多层处理的 GPR B-Scan 图像双曲线提取模型。在预处理层,采用最大类间方差方法 OTSU 阈值分割和形态腐蚀方法进行图像,然后通过聚类层列连接聚类(column-connection-clustering, C3)算法完成双曲线特征自动提取,消除不规则曲线。拟合层采用简化的带鲁棒约束条件正交距离拟合算法(robust orthogonal-distance fitting, RODF)拟合双曲线参数,最后通过仿真实验和真实 GPR B-Scan 图像验证本文方法的有效性。

1 双曲线特征提取模型

1.1 GPR B-Scan 双曲线分析

探地雷达探测脉冲回波示意图如图 1 所示,通常为一个半波长的辐射脉冲从发射器探头发射,接收探头将来自埋藏物体的反射信号作为飞行时间的函数记录下来。脉冲雷达的飞行时间定义为脉冲从孤立目标反射到固定传播速度的介质中的往返飞行时间。通常,发射的脉冲会有一定的宽度和震圈边缘,而反射的脉冲会有一个独特的轮廓,这是由物体和周围介质的介电常数决定的。

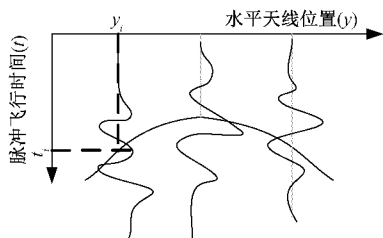


图1 GPR 脉冲回波示意图

假定管道的横截面是半径为 R 的圆形,中心在水平位置 Y ,埋管的圆心深度为 Z ,GPR 在管道正上方位置时,雷达回波时间为 t_0 。此时,当收集到一组来自一系列测量位

置 y_i 的埋管的脉冲,平均回波时间 t_i ,误差为 Δt_i ,测量位置相应误差为 Δy_i 。如图 2 所示为 GPR B-Scan 双曲线模型。

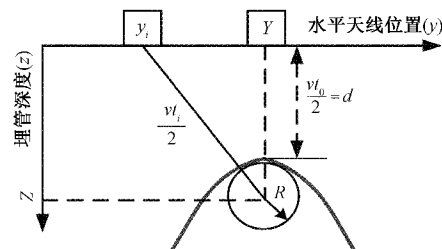


图2 GPR B-Scan 双曲线模型

由图 2 可知,当目标尺寸比雷达中心波长大时,根据直角三角形勾股定理可以很好地近似得到双曲线模型为:

$$Z^2 = \left(\frac{v t_i}{2} + R \right)^2 - (y_i - Y)^2 \quad (1)$$

显然,由式(1)可知,计算飞行时间的反射点位于管道中心 (Y, Z) 与单站天线位置 y_i 相交的圆截面上,再通过雷达波的传播速度 v 和传播时间可以计算出埋管的深度和埋管直径。

1.2 多层融合提取模型设计

为了能够较好地检测出双曲线,本文提出多层融合处理的 GPR B-Scan 双曲线提取模型,如图 3 所示。

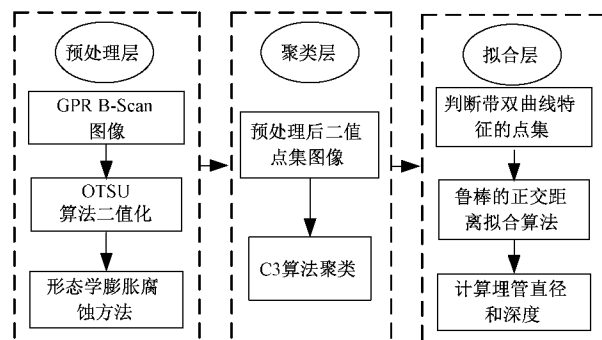


图3 多层融合处理的 GPR B-Scan 双曲线提取模型

模型主要分成预处理层、聚类层和拟合层 3 层,其中模型预处理层主要采用 OTSU 算法对 GPR B-Scan 图像进行二值化分割处理,并结合形态学膨胀腐蚀方法消除生成的二值图像噪声点;模型聚类层采用列连接聚类算法(C3)对二值化点集图聚类,聚类输出带双曲线特征的点集。最后,拟合层采用鲁棒的正交距离拟合算法拟合带双曲线特征的点集,提取埋管双曲线。

2 双曲线多层融合提取模型

2.1 GPR B-Scan 图像预处理层

预处理层主要包括 OTSU 图像分割和形态学处理。这些方法均具有简单、高效等优点,具有非常广的应用领域。

令 GPR B-Scan 扫描得到的图像的灰度级为 $G = \{0, 1, 2, \dots, N\}$,OTSU 方法采用类间方差 σ_B^2 作为

阈值判决函数。

$$\sigma_B^2(t) = \frac{[u_N \omega(t) - u_i]^2}{\omega(t)[1 - \omega(t)]} \quad (2)$$

式中: N 为最大灰度级; $\omega(t) = \sum_{i=0}^t \text{Pr}(i)$, $\text{Pr}(i)$ 表示灰度级 i 出现的概率。

$$u_i = u(t) = \sum_{i=0}^t i \text{Pr}(i) \quad (3)$$

则最佳阈值 T 为:

$$\sigma_B^2(t) = \max_{0 \leq t \leq 255} \{\sigma_B^2(t)\} \quad (4)$$

获得二值图像后,由于 GPR 图像中存在噪声以及因二值化分割后存在的一些干扰,影响后续目标的检测。为此,采用形态学方法,去除图像噪声和消除二进制图像中目标曲线之间的粘连。

定义一个结构体 B ,二值化图像的膨胀过程就是 B 对每个像素点集合 $F = f(x, y)$ 进行扫描,并对两个集合相交的点进行或运算,实现二值化图非零点边缘向外扩展。腐蚀过程是两个集合相交点进行与运算,实现二值化图非零点边缘向内收缩。本文采用使用闭操作(先膨胀后腐蚀)来填充具有小孔的对象,以小间隙连接相邻的对象,并平滑其边界。然后执行开操作(先腐蚀后膨胀)以消除细微点,在细微的点处分离关节物体,并平滑物体的边界。

2.2 GPR B-Scan 二值图像聚类层

在完成预处理后,针对双曲线特征聚类自动提取和消除不规则曲线问题,本文提出采用列相连聚类算法,将预处理后的二进制图像区域进行不同点集聚类处理。

列连接是列段沿着二进制图像的列扫描搜索,当聚类连续点集数量等于或大于最佳的阈值 S 的点集。图 4 所示为列相连聚类算法模型,假设列段阈值 S 预定义值为 3,在列类 C_0 中,沿着这一列从上至下进行扫描,得到 3 个列段,生成编号 1~3 列段点集。紧接着扫描列段 C_1 ,并获得该列的列段点集。由于类 C_0 第 1 列段和类 C_1 的第 1 列段有 3 个相连的点,则点集扩展到下一列,以包含来自后一列的列段的像素点, C_0 列段 1 扩展到列类 C_1 中。

列类 C_1 有 2 个列段点集和列类 C_0 的 2 号列段点集有 3 个相连像素点,在这种情况下 C_0 的 2 号点集也扩展到列类 C_1 ,形成两个新的点集 A 和 B 。列类 C_0 群集 2 中的所有像素点都与两个新点集相关联,其中列类 C_1 的第 2 列中的像素点添加到了点集 A ,而列类 C_1 的第 3 列中的像素点添加到了点集 B 。对于列类 C_0 第 3 列段和 C_1 中没有连接像素点,所编号 3 列段停在列类 C_0 ,并作为噪声点被消除。由于列类 C_1 的第 4 列段具有 3 个像素点,满足不少于阈值 S ,并且前一列 C_1 中没有连接像素点,则从列类第 4 列段像素点作为种子的新点集,继续执行此过程,直到扫描最后一列以获得基于列连接的所有点集。对于来自 C3 算法的每个输出点集,该算法相对于扫描方向是对称的,即执行扫描过程没有左右方向区别。

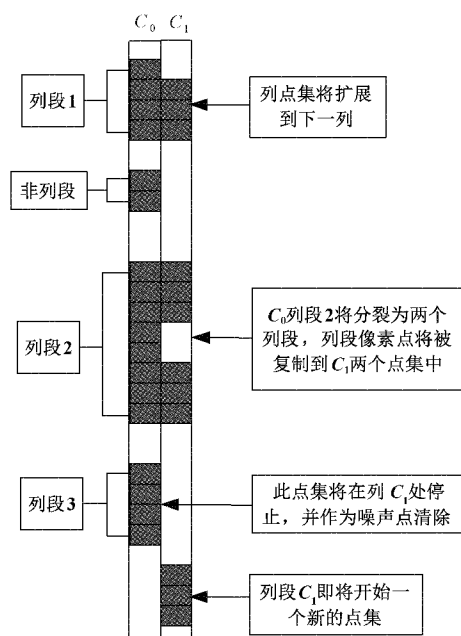


图 4 列段相连聚类算法模型

C3 聚类算法聚类分离出具有交点的曲线点集,连接各聚类列段点集的中心点曲线,如图 5 所示为 GPR S-Scan 二值图 C3 聚类算法聚类后列中心点相连双曲线示意图。

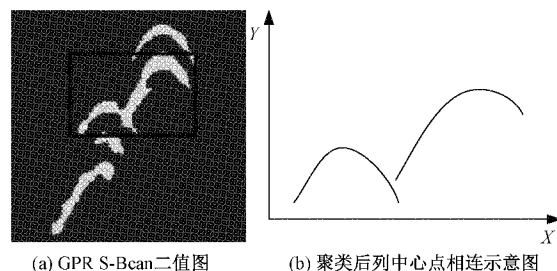


图 5 C3 聚类算法聚类中心点相连双曲线示意图

最后聚类层输出带曲线特征点集进入下一层双曲线拟合层进行下开口曲线判断和双曲线拟合操作。

2.3 GPR B-Scan 二值图像聚类层

在聚类层完成双曲线特征提取后,针对存在不完整的双曲线等问题,本文在双曲线拟合层中采用鲁棒正交距离拟合法,主要包括双曲线鲁棒约束条件的判断和简化双曲线拟合法。

首先是双曲线鲁棒约束条件,在带双曲线特征的 GPR B-Scan 图中,通过最小化曲线与点集代数距离平方和,得到较完整的下开口抛物线公式:

$$\frac{(y - y_0)^2}{a^2} - \frac{(x - x_0)^2}{b^2} = 1 \quad (5)$$

式中: y 和 x 分别为纵坐标和横坐标值,纵坐标与波的双向传播时间成正比,横坐标与波沿测量方向的距离成正比; (x_0, y_0) 为双曲线的中心点坐标, a 是半长轴的长度, b 是半短轴的长度。

在带双曲线特征的二值图中,采用简化的带鲁棒约束条件正交距离拟合算法 RODF。具体地,给定一组点集 $P_i(x_i, y_i)=1$,假设 $P_{\min}(x_{\min}, y_{\min})$ 是双曲线上最接近 P_i 的点,则由双曲线方程可知点 P_i 与双曲线的正交距离 z_i 为:

$$z_i = \sqrt{(x_i - x_{\min})^2 + (y_i - y_{\min})^2} \quad (6)$$

式中: $P_{\min}$ 点和 P_i 的连接线垂直于双曲线在 $P_{\min}$ 点的切线,因此 $P_{\min}$ 坐标满足:

$$\frac{dy}{dx} \cdot \frac{y_i - y_{\min}}{x_i - x_{\min}} = -1 \quad (7)$$

将点 $P_{\min}$ 代入式(5)和(7)可得:

$$\frac{a^2(x_{\min} - x_0)}{b^2(y_{\min} - y_0)} \cdot \frac{y_i - y_{\min}}{x_i - x_{\min}} = -1 \quad (8)$$

因此通过双曲线的 $B^2 - 4AC = -1$ 这个限制条件确定拟合的双曲线是开口向下的抛物线。而双曲线的拟合主要是由抛物线的 a, b, x_0 和 y_0 参数值决定。当 P_i 点不在拟合的双曲线上,则 $P_{\min}(x_{\min}, y_{\min})$ 难以确定,无法自动拟合提取双曲线。

为了更清晰地描述拟合过程,图6所示为双曲线正交距离拟合的一个示例。首先,扫描带双曲线特征的点集,取下开口的双曲线的顶点,给定顶点坐标为 $P_i(x_i, y_i)$,在顶点 P_i 右侧取点 $P_r(x_r, y_r)$ 和左侧取点 $P_l(x_l, y_l)$ 。由于需要拟合点集到双曲线的下半部分,则上述取点的位置坐标需满足如下约束条件:

$$y_r > \frac{(x_l - x_i)^2 \cdot y_l - (x_r - x_i)^2 \cdot y_i}{(x_l - x_i)^2 - (x_r - x_i)^2} \quad (9)$$

$$y_r < y_l + \frac{(x_i - x_r) \cdot (y_l - y_i)}{x_l - x_i} \quad (10)$$

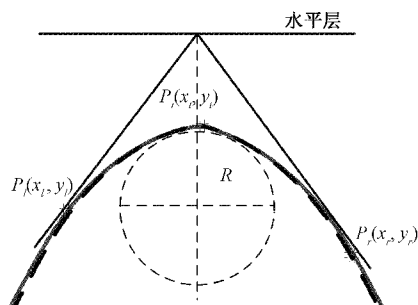


图6 鲁棒正交距离拟合双曲线示意图

对给定曲线上组点集 $P_i(x_i, y_i)$,若该点满足上述的约束条件,则可以直接用 P_r 的值直接计算双曲线的抛物线参数;如果点不满足上述约束条件,则该点的值被替换成右侧点的平均值,则抛物线的4个参数计算如下:

$$y_0 = \frac{(x_l - x_i)^2 \cdot y_r^2 - (x_r - x_i)^2 \cdot y_l^2 + [(x_r - x_i)^2 - (x_l - x_i)^2] \cdot y_i}{2[y_l \cdot (x_l - x_i)^2 - y_l \cdot (x_r - x_i)^2 + y_r \cdot [(x_r - x_i)^2 - (x_l - x_i)^2]]} \quad (11)$$

$$a = y_0 - y_i \quad (12)$$

$$b = \sqrt{\frac{(x_r - x_i)^2 \cdot (y_0 - y_i)^2}{(y_l - y_0)^2 - (y_0 - y_i)^2}} \quad (13)$$

取顶点 $P_i(x_i, y_i)$ 和上述参数值代入双曲线方程中,求得 x_0 为:

$$x_0 = x_i - \frac{\sqrt{b^2(y_l - y_0)^2 - a^2}}{a} \quad (14)$$

最终根据上述双曲线的参数,拟合绘制 GPR B-Scan 二进制图抛物线,进而计算抛物线方程得到地下埋管的深度和埋管直径。

3 实验验证与结果分析

本文基于 GPR 仿真软件(GPRMAX)仿真 GPR B-Scan 图片数据和实际应用场景 GPR 采集的 B-Scan 图片数据验证本文提出的多层融合双曲线拟合和特征提取方法的有效性。

3.1 GPRMAX 仿真图片数据实验分析

GprMax 是一种基于有限差分域数值方法开发的 GPR 仿真器,图7为 GprMax 仿真器生成5根金属质埋管的仿真模拟埋管图。

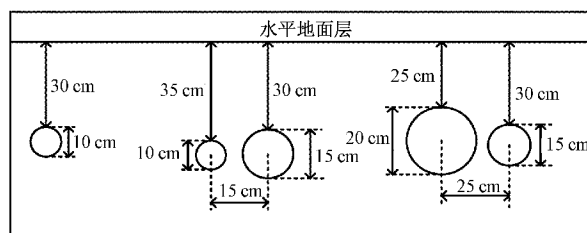


图7 GprMax 仿真器仿真模拟埋管图

通过设置埋管的深度和直径大小不同,使得 GPR 扫描生成的 B-Scan 图像中的双曲线之间存在交叉点,且达到逼真的雷达波衍射反射。仿真器在理想条件下水平地面层无雷达波反射介质。从左至右金属埋管的深度和直径如表1所示。

表1 GprMax 仿真埋管信息

埋管编号	1号	2号	3号	4号	5号
深度 Z/cm	30	35	30	25	30
直径 R/cm	10	10	15	20	15

图8为仿真输出的 B-Scan 图,图中距离相近的埋管产生了许多交叉点和雷达回波衍射反射。

图9所示为预处理层中 OTSU 算法分割处理以及形态学处理后 GPR B-Scan 图。从图9(a)可以看出,阈值化的二值图像中存在噪声以及其他干扰。经过形态学处理后,基本上消除二值化图像中目标曲线之间的粘连和回波噪声,如图9(b)所示。

图10所示为双曲线聚类层对二值图进行群集聚类结果。不难发现,通过群集聚类消除了不规则开口的和不完

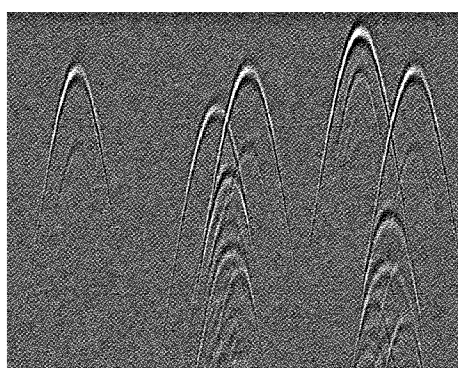


图 8 GprMax 输出的 B-Scan 图

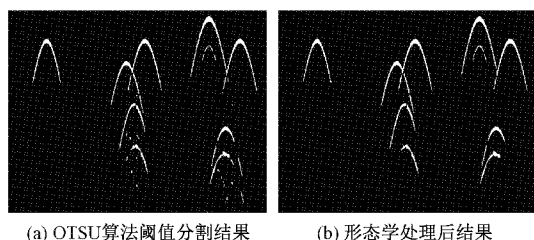


图 9 图像预处理结果

全双曲线,分类出带特征的双曲线,为双曲线检测提供了便利。

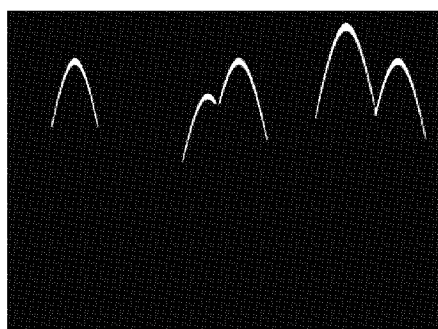


图 10 C3 聚类算法输出结果

图 11 所示为 RODF 算法用于拟合带有双曲线特征的群集的结果,同时计算拟合后的双曲线得到管道深度和半径,如表 2 所示。不难发现,本文所提出的多层融合双曲线特征提取模型平均拟合正确率达到了 97.64%,在理论条件下验证了模型的正确性。

表 2 模型输出结果

埋管编号	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号
深度 Z/cm	29.19	34.21	29.18	24.44	29.20
直径 R/cm	9.75	9.74	14.63	19.51	14.62

3.2 GPR B-Scan 真实数据实验分析

本文为了验证设计模型的有效性,分别在混凝土材质和潮湿土壤材质等两种实际应用场景 GPR 采集的 B-Scan 图片数据图做实验测试。图 12 所示为混凝土实际工况应

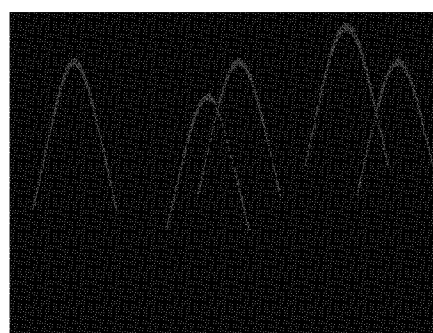


图 11 RODF 算法拟合后的双曲线

用场景中的 GPR B-Scan 图数据,其中方框标出疑似双曲线。

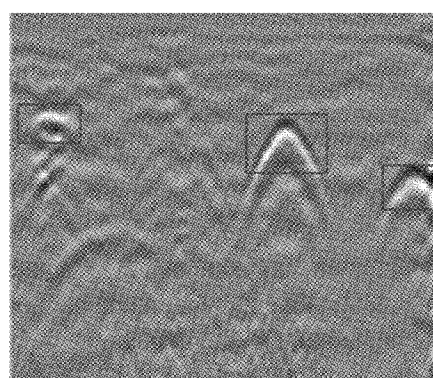


图 12 GPR B-Scan 混凝土图数据

图 13 所示为 GPR B-Scan 图像预处理结果。从图中可以发现,存在许多凸起凹陷的噪声点、双曲线交叉点和雷达回波衍生。此时,通过形态学膨胀腐蚀方法消除了大部分小裂缝和离散的噪声点,但仍然存在一些不具有双曲线特征的点集。

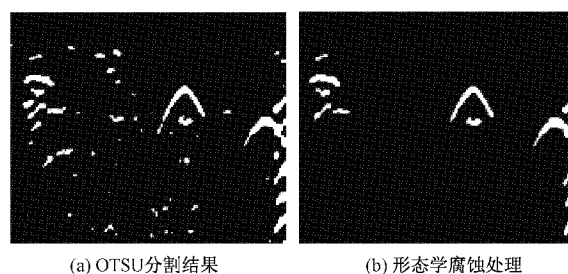


图 13 GPR B-Scan 图像预处理结果

图 14 所示为 GPR B-Scan 预处理后图经过 C3 聚类算法聚类生成带双曲线特征点集图,基本上消除了大部分非完整性点集。

进一步地,将图 14 的结果通过本文 ORDF 算法拟合,提取得到 3 个双曲线如图 15 所示,具体实验数据如表 3 所示。通过计算拟合后的双曲线得到埋管直径和深度。

为了验证设计的模型,可以识别和提取不同土质的 GPR B-Scan 真实图,图 16 所示为在潮湿土壤中的 GPR

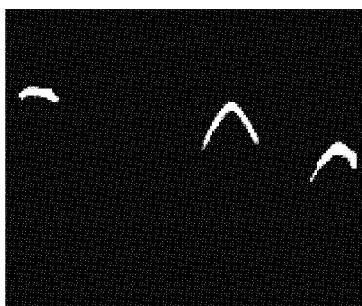


图 14 C3 算法聚类细分处理图



图 15 RODF 算法拟合成的双曲线

表 3 GPR 图实际数据与实验测试数据对比

埋管编号	1	2	3
GPR Z/cm	119	123	131
GPR R/cm	40	20	25
测试 Z/cm	110.9	118.3	127.5
测试 R/cm	36.9	18.7	23.6
拟合正确率/%	92.25	93.50	94.40

B-Scan 图数据,其中埋管深度和直径分别为 21.4 和 16 cm,图 17 所示为 OTSU 算法二值化处理后的图像,从二值图中可以看出在潮湿的土质条件下,双曲线周围有不规则雪花状噪声。

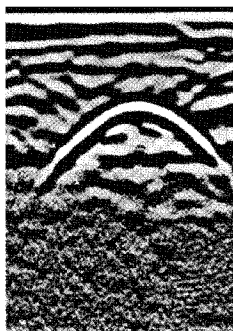


图 16 GPR B-Scan 湿地图数据

进一步通过形态学腐蚀处理得到如图 18 所示的二值化图,与处理过后的二值图同样存在不规则点段曲线,图 19 所示为 C3 算法聚类后生成的双曲线,基本上完全消除了大块雪花噪声和不规则点段曲线。

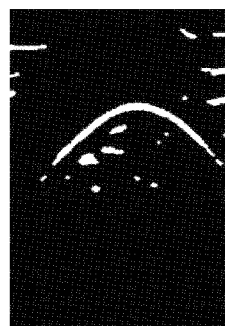


图 17 OTSU 分割结果



图 18 形态学腐蚀处理

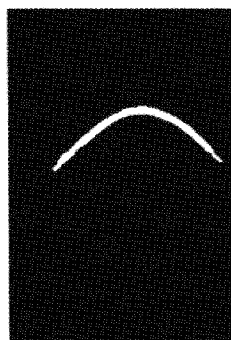


图 19 C3 算法聚类处理结果

最后图 20 所示为 ORDF 算法拟合后的双曲线,通过计算双曲线的参数得到埋管深度和直径分别为 20.4 和 15.3 cm。对比实际 GPR 图中的埋管直径和深度,表明本文提出模型可以有效并正确的提取不同土质 GPR B-Scan 图双曲线。

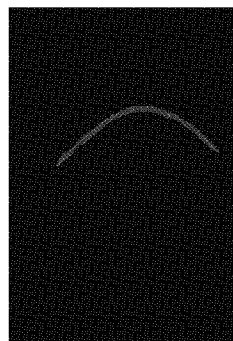


图 20 RODF 算法拟合成的双曲线

4 结 论

本文提出了一种融合图像预处理层、双曲线特征聚类层和双曲线拟合层多层处理的 GPR B-Scan 图像双曲线提取模型。在该模型,首先采用 OTSU 阈值分割和形态学方法预处理;其次,采用聚类层 C3 聚类算法获取图像中双曲线点集。拟合层采用 RODF 算法,增强双曲线拟合的鲁棒性。最后 GprMax 平台仿真和真实 GPR B-Scan 数据实验验证提出模型的正确性和有效性,为后续的应用推广奠定基础。

参考文献

- [1] 张亚东,毕建军,王中明,等.基于探地雷达的电力隐蔽设备智能检测系统[J].电力信息与通信技术,2018,16(7):40-45.
- [2] 赵迪,叶盛波,周斌.基于 Grad-CAM 的探地雷达公路地下目标检测算法[J].电子测量技术,2020,43(10):113-118.
- [3] 廖旭涛,洪天求,刘东甲,等.线电流激励下偏心介质柱的电磁散射[J].电子测量与仪器学报,2018,32(3):52-59.
- [4] CHENG X, SHAO W, WANG K, et al. Uncertainty analysis in dispersive and lossy media for ground-penetrating radar modeling[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2019,18(9):1931-1935.
- [5] 尹德,叶盛波,张经纬,等.公路结构和介电特性对探地雷达反射回波的影响研究[J].电子测量技术,2018,41(5):51-56.
- [6] ZENG Z, LI J, HUANG L, et al. Improving target detection accuracy based on multipolarization MIMO GPR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2015,56(1):15-24.
- [7] 李文生,原达,苗翠,等.基于多标签层次聚类的 GPR 图像双曲线提取方法[J].图学学报,2020,41(3):399-408.
- [8] 郑俊,刘婉萍,马念茹,等.探地雷达信号杂波抑制[J].电子测量技术,2018,41(21):63-66.
- [9] SHANG P, AL-QADI I L. Calibration of FDTD simulation of GPR signal for asphalt pavement compaction monitoring[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 56(3):1538-1548.
- [10] ZOU L, YL L, SATO M. On the use of lateral wave for the interlayer debonding detecting in an asphalt airport pavement using a multistatic GPR system[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020,58(6):4215-4224.
- [11] GIANNAKIS I, GIANNOPOULOS A, WARREN C. Realistic FDTD GPR antenna models optimized using a novel linear/nonlinear full-waveform inversion[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019,57(3):1768-1778.
- [12] ZHANG X, HAN L, ROBINSON M, et al. A GANs-based deep learning framework for automatic subsurface object recognition from ground penetrating radar data[J]. IEEE Access,2021,9(1):39009-39018.
- [13] ZHANG X P, BOLTON J, GADER P. A new learning method for continuous hidden Markov models for subsurface landmine detection in ground penetrating radar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014,7(3):813-819.
- [14] 徐宙,杨会民,刘连照,等.基于图像处理的指针式温湿度计读数识别方法[J].国外电子测量技术,2019,38(7):32-36.
- [15] WIATOWSKI T, BOLCSKEI H. A Mathematical theory of deep convolutional neural networks for feature extraction[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2018,64(3):1845-1866.
- [16] LIU A, ZHOU D, CHEN L, et al. Saliency detection and edge feature matching approach for crater extraction[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics,2015,26(6):1291-1300.
- [17] MANANDHAR A, TORRIONE P A, COLLINS L M, et al. Multiple-instance hidden Markov model for GPR-based landmine detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(4):1737-1745.
- [18] MISSAOUI O, FRIGUI H, GADER P. Land-mine detection with ground-penetrating radar using multistream discrete hidden Markov models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2011,49(6):2080-2099.

作者简介

蓝雄光,工学学士,高级工程师,主要研究方向为仪器与测试技术、探地雷达图像处理与识别、电气工程及其自动化等。

E-mail:2998228317@qq.com

周东国(通信作者),工学博士,讲师,主要研究方向为信息信号采集、红外图像处理技术、探地雷达图像处理与识别、非侵入式电力负荷算法研究等。

E-mail:dgzhoul985@whu.edu.cn