

基于对数极坐标变换的 X 射线焊缝缺陷 图像识别算法 *

丛 军, 张辉宇, 谢 建, 陈健飞, 高海涛,
张 宏, 韩曙光, 王 征

(中石化胜利海上石油工程技术检验有限公司, 山东 东营 257000)

摘 要: 为了提高 X 射线焊缝图像缺陷分类识别的成功率, 提出利用对数极坐标变换 (LPT) 的距离及角度不变特性解决实际缺陷识别中因缺陷图像位置、形状及方向变换导致的识别准确率下降问题。同时, 为降低噪声的影响, 提出基于压缩传感技术的缺陷识别, 将待检测图像视为一组样本图像的线性组合, 通过求取系数向量确定待检测图像的类型。由于缺陷的信息存于一组系数向量中, 而非依赖于某几个特定的特征值, 因此任一图像的变化对最终识别结果不会造成影响。实际试验表明, LPT 结合压缩传感技术可以实现较高的 X 射线焊缝图像缺陷识别率, 极大地降低了噪声误报率。

关键词: 缺陷识别; X 射线; 压缩感知; 对数极坐标变换

中图分类号: TG441.7

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.02.006

Algorithm for Detecting X-ray Welding Defects Image based on LPT

CONG Jun, ZHANG Huiyu, XIE Jian, CHEN Jianfei, GAO Haitao,

ZHANG Hong, HAN Shuguang, WANG Zheng

(Shengli Offshore Petroleum Engineering Technology Inspection Co., Ltd., Sinopec, Dongying 257000, Shandong, China)

Abstract: In order to improve the success rate of X-ray welding defect identification, the distance and angle invariance of log polar coordinate transformation (LPT) is proposed to solve the problem of accuracy degradation caused by the transformation of defect image position, shape and direction in practical defect recognition. At the same time, in order to reduce the influence of noise, a defect recognition based on compressed sensor technology is proposed. The image to be detected is regarded as a linear combination of a group of sample images, and the type of image to be detected is determined by calculating the coefficient vector. Because the information of defect image is reflected by a group of coefficient and not by some specific characteristics, any change in one image has no influence on the recognition result. Experiments show that LPT combined with compress sensor can achieve high defect recognition rate of X-ray weld image and greatly reduce the noise false alarm rate.

Key words: defect recognition; X-ray; compressed sensing; log polar coordinate transformation

0 前 言

在焊缝缺陷检测过程中, X 射线检测作为一种重要的无损检测方法, 一直备受青睐。X 射线焊缝图像检测大都通过滤波、图像增强、图像分割和缺陷识别四个步骤完成缺陷自动识别。王勇^[1]等提

出先确定焊缝图像位置, 后利用形态学对焊缝图像进行缺陷检测的方法, 提高判别的准确性。张晓光^[2]等指出利用部分缺陷的方法, 在观察到存在缺陷的位置采取分水岭变换和子束变换分割出焊缝缺陷。邵家鑫^[3]等在检查较厚的器件时发现器件不能及时同步且存在噪声较大等干扰因素, 利用消除法和

* 基金项目: 陕西省重点研发计划项目“冷阴极X射线焊缝缺陷自动检测系统”(项目编号2020GY-179)。

波形分析法检测出焊缝缺陷。罗永仁^[4]等在对缺陷类型识别之前,对采集到的图像首先处理模糊边缘,采用了传统的图像分割方法(如边缘检测法和阈值分割法)。陈方林^[5]等提出基于支持向量机的焊缝缺陷检测方法,这种方法是先对样本进行训练,针对所得模型分割缺陷图像。随着计算机技术的发展,智能算法也被引入 X 射线焊缝缺陷识别领域,HERNANDEZ^[6]等针对铝铸件的 X 射线焊缝图像进行了缺陷识别的研究,在提取图像特征后采用了模糊神经网络进行模式识别。彭俊杰^[7]等提出一种基于感知器模型的有效提取缺陷特征和分类识别的算法,并对 500 张缺陷图片进行了识别计算,取得了很好的效果。ALGHALANDIS^[8]等利用自适应特征提取和神经网络分类器进行缺陷识别,并且比较了 BP 神经网络和模糊神经网络两种神经网络的缺陷识别率。VALAVANIS^[9]等系统地总结了缺陷的 43 种特征,并设计了基于神经网络的分类器,但文中未提及分割实验效果好坏。

已有研究大多基于缺陷的几何或纹理特征,但由于缺陷面积相对较小,且由于噪音影响,无法准确获取图像的特征值。因此提出一种基于压缩传感技术的焊缝缺陷识别方法,该方法无需求取特征值,减少了噪音对识别的影响。针对缺陷大小及位置旋转等因素对识别结果产生的干扰,将对数极坐标变换(LPT)引入 X 射线焊缝图像缺陷识别,充分利用对数极坐标映射在立体视觉变换中的研究成果^[10-12],实现具有较强鲁棒性的缺陷识别。

1 LPT 变换原理

图 1 为焊缝 X 射线图像,位于焊缝中的缺陷面积相对较小,而且存在位置及方向的变化,都为准确自动地识别缺陷带来较大的困难。

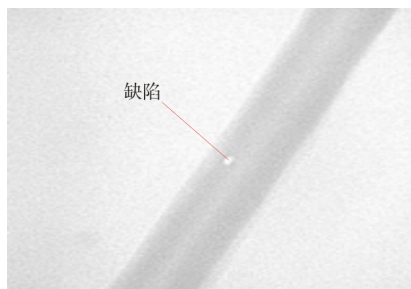


图 1 X 射线焊缝缺陷图像

实际缺陷检测时,首先需要通过图像分割的方法确定疑似缺陷区域(suspected defect region, SDR)。SDR 可定义为分割出来的疑似缺陷外切矩形再向外扩展 5 个像素点后的矩形区域,如图 2 所示。以图 1 的缺陷为例,缺陷的 SDR 如图 3 所示。

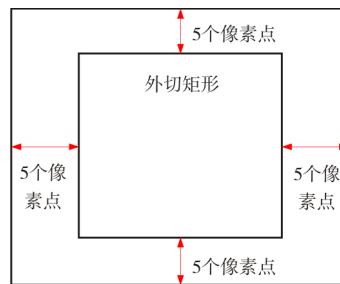


图 2 疑似缺陷区域定义



图 3 图 1 中缺陷的 SDR 图像

不同 X 射线焊缝图像的缺陷可能会存在旋转,导致缺陷识别准确率下降。而 LPT 变换可以将旋转等操作变为简单的平移操作,识别时可通过模板图像,判断“疑似局部图像”是否为缺陷,提高识别的准确率。对数极坐标变换是以笛卡尔坐标代表视网膜(场景平面)坐标位置,对数极坐标对应视皮层坐标位置。

X 射线焊缝图像的笛卡尔坐标平面 (x, y) 可以表示为

$$z = x + iy \quad (1)$$

对应的极坐标平面 (ρ, θ) 可以表示为

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta = \arctan \frac{y}{x} \end{cases} \quad (2)$$

对应的对数极坐标平面 (ζ, τ) 可以表示为

$$\begin{cases} \zeta = \log \rho \\ \tau = \theta \end{cases} \quad (3)$$

可以发现,对数极坐标变换可在轴向把尺度的变化转变为对数极坐标图像的上下平移。缺陷以注视点为中心放大 k 倍时,变换式对应关系为

$$\zeta_1 = \log(k \cdot \rho) \quad (4)$$

由公式(4)可得

$$\zeta_1 = \log k + \log \rho, \text{ 即}$$

$$\zeta_1 = \zeta + \log k \quad (5)$$

公式(5)相当于缺陷图像的放大图向下移动 $\log k$ ，形状的变换成为简单的平移。 τ 坐标方面，缺陷围绕注视点旋转 L 弧度，即

$$\tau_1 = \tau + L \quad (6)$$

由公式(6)可知，焊缝图像缺陷围绕注视点旋转 L 弧度，相当于映射变换图向右移动 L 个单位。

LPT变换中公式(5)和公式(6)反映的两个性质称为距离不变性与角度不变性。焊缝X射线图像中缺陷位置及形状不确定，通过对数极坐标变换可将其转化为典型缺陷图像的平移。因此，通过选定一组典型的X射线焊缝缺陷及噪声图像，就可通过线性拟合的方式拟合待检测图像。根据线性系数就可以判定待检测图像的类型。

压缩传感技术中，将待检测信号视为字典矩阵的线性组合，本研究用X射线焊缝缺陷和噪声典型图像构建字典矩阵，结合LPT变换实现具有较强鲁棒性的X射线焊缝缺陷图像识别。

2 识别算法研究方案设计

2.1 离线处理部分

(1) 搭建X射线焊缝图像检测系统。将获取焊缝的X射线图像，存入数据库。

(2) 对焊缝图像进行分析和评分。对图像进行分类。这里的分类不仅仅是根据有无缺陷和缺陷类型(裂纹、未焊透、未熔合、条形夹渣、球形夹渣和气孔)分类，同时还根据缺陷的大小和位置分类。缺陷图像的质量按5分制(1分质量最差，5分质量最好)由人工标出。

(3) LPT中心选取与LPT变换。

2.2 在线处理部分

(1) 实际现场X射线焊缝图像采集。

(2) 对图像的滤波增强后，利用各种传统方法提取焊缝图像数据库中缺陷的局部图像和由噪声形成误分割的局部图像。

(3) 应用已有的LPT中心算法和LPT变换算法进行变换。

(4) 建立压缩感知方程，使方程中的系数能在高维空间反映缺陷信息，且整个信息由系数共同决定，对个别系数值的影响降低，诊断更客观。

(5) 对压缩感知方程，通过试验比对以及理

论分析确定求解算法。

(6) 求解压缩感知的系数，根据稀疏系数进行识别。

由公式(1)~公式(6)可知，当变换中心始终是同一个点(或变化较小)时，发生旋转或缩放的图像在变换图中反映为简单的平移。因此，LPT变换要确定合理的中心。分析图3所示的缺陷SDR图像可以发现，缺陷一般具有较大的灰度值。因此本研究选择亮度为中心，即图像中最亮的位置为中心。

3 压缩感知识别原理

压缩感知的理论基础是信号在特定方式表示下具有稀疏性。根据调和理论，离散时间信号 y ，它的长度为 N ，可表示为一组标准正交基的线性组合。把X射线焊缝图像作为信号 y ，它也可表示为一组典型X射线焊缝图像的线性组合，即

$$y = \psi h \quad (7)$$

其中， ψ 为由已分类的X射线焊缝图像构成的字典矩阵。根据 y 和 ψ 可以求得系数 h 。根据系数 h 可以确定 y 主要可表示为典型缺陷或噪声图像的线性组合。例如，将样本分为缺陷及噪声两类。 ψ 为两类图像的集合，即

$$\psi = \left\{ \underbrace{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{C_0}}_{\text{缺陷}}, \underbrace{\psi_{C_0+1}, \psi_{C_0+2}, \dots, \psi_{C_0+N_0}}_{\text{噪声}} \right\} \quad (8)$$

求解出的系数 $h = [h_1, h_2, h_k, \dots, 0, 0]$ ，显然 h 中不为0的系数与 y 的类别有关，通过系数向量 h 则可判别 y 的类型，而且 h 不为0系数的个数越少，越有利于判别。求系数 h 稀疏解的问题从数学上分析属于0范数最小化问题，即

$$\hat{h} = \arg \min \|h\|_0 \quad \text{s.t.} \quad y = \psi h \quad (9)$$

零范数最小化问题是非凸问题，很难求解。在工程实际应用中，对线性组合问题的求解也可以等效于求2范数最小化问题，即

$$\hat{h} = \arg \min \|h\|_2 \quad \text{s.t.} \quad y = \psi h \quad (10)$$

公式(10)又可以等效为

$$\hat{h} = \min \|y - \psi h\|_2 \quad (11)$$

利用OMP算法可以求解式(11)。OMP算法可以描述为：

(1) 初始化 $A_0 = \emptyset$ ， $\psi_0 = \emptyset$ ， $r_0 = y$ ， $i = 1$ 及迭代

次数 K ;

(2) 计算 $\lambda_i = \arg \max_{j=1, 2, \dots, N} |\langle r_{i-1}, \psi_j \rangle|$;

(3) 令 $\Lambda_i = \Lambda_{i-1} \cup \{\lambda_i\}$, $\psi_i = \psi_{\Lambda_{i-1}} \cup \psi_{\lambda_i}$;

(4) 利用最小二乘法计算 $y = \psi h_i$ 的解, 即

$$\hat{h} = \|\arg \min \|y - \psi h_i\|_2^2 = (\psi^T \psi)^{-1} \psi^T y$$

(5) 更新残差

$$r_i = y - \psi_i \hat{h}_i = y - (\psi_i^T \psi_i)^{-1} \psi_i^T y$$

(6) 令 $i=i+1$, 并判断是否成立, 成立转步骤 (2), 否则中止程序并输出。

其中, i 为迭代次数, r_i 为 i 次迭代的残差; Λ_i 为 i 次迭代选择的字典矩阵中向量编号构成的集合; λ_i 为 i 次迭代计算获得的字典矩阵向量编号; ψ_i 为依据 Λ_i 中编号选中 ψ 中对应向量构成的矩阵。

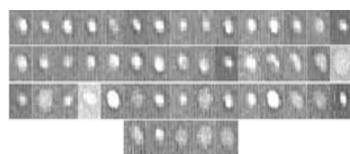
在求得 h 后, 可以根据系数向量判定 y 的类型, 本研究确定的缺陷判定标准如下:

$$\sum_{i=1}^{C_\psi} |h[i]| > \sum_{i=C_\psi+1}^{C_\psi+N_\psi} |h[i]| \text{ 时待检测图像为缺陷, 否则}$$

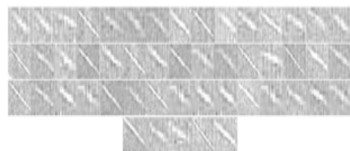
为噪声。其中, C_ψ 为 ψ 中典型缺陷图像的数量, N_ψ 为 ψ 中典型噪声图像的数量。

4 试验设计与分析

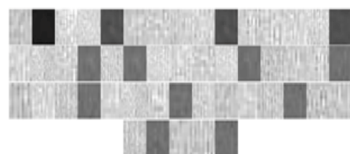
本研究首先选取 200 张缺陷样本及噪声样本图片, 部分缺陷 (圆形缺陷及线性缺陷) 及噪声图片如图 4 所示。



(a) 圆形缺陷局部区域图像



(b) 线性缺陷局部区域图像



(c) 噪声局部区域图像

图 4 部分缺陷及噪声典型图像

将典型缺陷及噪声图像归一化为 13×13 大小, 按行扫描优先的原则, 构成 169×1 的列向量, 再将这些列向量构成字典矩阵。

再将待检测的图像同样归一化为 13×13 大小, 按行扫描优先的原则, 构成 169×1 的列向量 y 。

焊缝噪声和缺陷局部图像如图 5 所示, 利用 OMP 算法求解 h 后的系数为

$$\sum_{i=1}^{200} |\hat{x}_2[i]| = 0, \sum_{i=201}^{400} |\hat{x}_2[i]| = 1\ 694.601 \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{200} |\hat{x}_2[i]| = 177.171\ 4, \sum_{i=201}^{400} |\hat{h}[i]| = 1\ 634.278 \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{200} |\hat{h}[i]| = 1\ 053.453, \sum_{i=201}^{400} |\hat{h}[i]| = 0 \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{200} |\hat{h}[i]| = 2\ 030.792, \sum_{i=201}^{400} |\hat{h}[i]| = 0 \quad (15)$$

通过判别标准, 可以确定图 5 (a) 为噪声, 图 5 (b) 为缺陷。



(a) 噪声

(b) 缺陷

图 5 焊缝噪声和缺陷局部图像

为进一步验证 LPT 结合压缩传感识别方法的有效性, 在 4G 内存、i5 处理器的硬件环境下, 以 MATLAB R2013a 为试验平台进行试验, 首先对圆形缺陷和线性缺陷识别进行测试, 试验结果见表 1。

表 1 LPT 变换器前后分类结果

类别	检出		未检出		准确率
	圆形	线形	圆形	线形	
未加入 LPT 变换	87	90	10	13	88.5%
加入 LPT 变换	97	83	3	17	90.0%

为进一步验证算法有效性, 进一步对 200 张缺陷 SDR 和 200 张噪声 SDR 进行试验。试验结果按混淆矩阵进行验证, 混淆矩阵格式见表 2。

表 2 混淆矩阵格式

图片类型	识别为缺陷	识别为噪声
缺陷图片	true positive, TP	false negative, FN
噪声图片	false positive, FP	true negative, TN

在混淆矩阵基础上, 再根据敏感度 (Sensitivity) 和特异度 (Specificity) 来分析算法

的有效性。敏感度和特异度的计算公式为

$$\text{Sensitivity} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (16)$$

$$\text{Specificity} = \frac{TN}{FP+TN} \quad (17)$$

试验中图像归一化尺寸为 $8 \times 8 \sim 17 \times 17$ ，试验结果见表 3。由表 3 可知，识别时 SDR 归一化尺寸为 13×13 时识别准确率最高。未能准确识别的缺陷和噪声图像如图 6 所示。

表 3 混淆矩阵试验结果

归一化尺寸	TP	FN	FP	TN	敏感度%
8×8	188	12	20	180	94
10×10	187	13	10	190	93.5
13×13	194	6	4	196	97.00
15×15	186	14	3	197	93.00
17×17	187	13	2	198	93.50



(a) 未成功识别的缺陷图像



(b) 未识别的噪声图像

图 6 未识别的缺陷图像和噪声图像

由图 6 可以发现，未能准确识别的 X 射线焊缝图像大多较为模糊，由于受到噪声等因素的干扰，缺陷图像没有明确的边缘，因此造成误判。表 3 所获得的数据针对的图像为 400 张，在实际检测中，如出现类似图 6 (a) 所示的缺陷图像较多时，也可能使得实际识别准确率下降。

5 结束语

基于 LPT 和压缩传感技术的 X 射线焊缝缺陷识别可以有效的降低因缺陷旋转和位移带来的误判，且无需再求取几何或纹理特征值。实际试验表明，本研究所介绍的方法可将缺陷识别的准确率提高至 97%，具有较好的实际应用价值。

参考文献：

- [1] 王勇,郭慧. 基于形态学的焊缝 X 射线图像缺陷检测[J]. 东华大学学报,2013,39(4):460-463.
- [2] 张晓光,孙正,胡晓磊,等. 射线检测图像中焊缝和缺陷的提取方法[J]. 焊接学报,2011,32(2):77-80.
- [3] 邵家鑫,都东,石涵. 基于厚壁工件 X 射线实时成像的焊缝缺陷自动检测[J]. 清华大学学报(自然科学版),2013,53(2):150-154.
- [4] 罗永仁,晏飞. 故障智能诊断技术及其在矿井提升机上的应用研究[J]. 煤炭技术,2007,26(11):117-119.
- [5] 陈方林,刘彦. 基于支持向量机的 X 射线焊缝缺陷检测[J]. 机械工程与自动化,2010(2):122-126.
- [6] HERNANDEZ S, SAEZ D, MERY D. Neuro-fuzzy method for automated defect detection in aluminium castings[C]// International Conference Image Analysis and Recognition. Berlin, Germany: Springer, 2004: 826-833.
- [7] PENG J. A method for recognition of defects in welding lines [C]//2009 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence. [s.l.]: IEEE, 2009:366-369.
- [8] ALGHALANDIS S M, ALAMDARI G. Welding defect pattern recognition in radiographic images of gas pipelines using adaptive feature extraction method and neural network classifier [C]//23rd World Gas Conference. Amsterdam:[s.n.], 2006: 1-13.
- [9] VALAVANIS I, KOSMOPOULOS D. Multiclass defect detection and classification in weld radiographic images using geometric and texture features[J]. Expert Systems with Applications,2010,37(12):7606-7614.
- [10] WEIMAN C F R, JUDAY R D. Tracking algorithms using log-polar mapped image coordinates [M]//International Society for Optics and Photonics. Intelligent Robots and Computer Vision VIII: Algorithms and Techniques. Philadelphia:[s.n.], 1990.
- [11] TISTARELLI, SANDINI G. On the advantages of polar and log-polar mapping for direct estimation of time-to-impact from optical flow[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence,1993,15(4):401-410.
- [12] FERRARI F, NILSEN J, QUESTA P, et al. Space variant imaging[J]. Sensor Review,1995,15(2):18-20.

作者简介：丛 军 (1971—)，男，硕士，高级工程师，主要从事无损检测研究。

收稿日期：2021-08-23

修改返回日期：2021-09-30

编辑：董 超