

# 基于背景估计的焊缝缺陷检测\*

张小琳 刘 祎 白贇汎 刘 研 李文强 桂志国

(中北大学生物医学成像与影像大数据山西省重点实验室 太原 030051)

**摘要:** 针对射线检测图像中缺陷识别率低的问题,利用背景估计和差分运算来增强缺陷、抑制复杂背景和噪声。该方法首先利用 Otsu 分割获得的掩模图像提取焊缝区域;其次通过改进的中值滤波对焊缝区域进行背景估计,反背景差分获得含有缺陷的差分图像;随后根据缺陷与误检边缘处梯度方向的差异性,利用多方向多级梯度有效解决背景残余问题;最后通过自适应阈值分割将含有缺陷的差分图像二值化。实验结果表明,该方法具有较高的缺陷识别率,召回率和准确率分别达 91.90% 和 90.95%,在实际中具有较好的应用价值。

**关键词:** 焊缝缺陷;掩模图像;背景估计;多方向多级梯度

**中图分类号:** TP391;TG409 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.60

## Weld defect detection based on background estimation

Zhang Xiaolin Liu Yi Bai Yunfeng Liu Yan Li Wenqiang Gui Zhiguo

(Shanxi Provincial Key Laboratory for Biomedical Imaging and Big Data, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of low defect recognition rate in radiographic images, background estimation and differential operations are used to enhance defects and suppress complex background and noise. The method first used the mask image obtained by Otsu segmentation to extract the weld area; Secondly, the background estimation of the weld area was performed by the improved median filter, and the difference image containing the defect was obtained by inverting the background difference; Then, according to the difference of the gradient direction at the edge of the defect and the false detection, the multi-directional and multi-level gradient was used to effectively solve the background residual problem; Finally, the differential image containing the defect was binarized by adaptive threshold segmentation. After experimental simulation, this method has a high defect recognition rate, with a recall rate and an accuracy rate of 91.90% and 90.95%, respectively, which has good application value in practice.

**Keywords:** weld defect; mask image; background estimation; multi-directional multi-level gradient

### 0 引 言

随着国内外焊接技术地广泛应用,焊接质量要求也越来越高,它决定着焊接结构件的承载能力和使用寿命。但在焊接过程中会不可避免地产生各种缺陷,导致管道的破裂,危及焊件的安全使用以及人类安全<sup>[1]</sup>。传统的人工评定焊缝底片或图像的方式有很多缺点,例如:主观性强、效率低、过度依赖于评定人员技术水平,而且目前的缺陷检测方法存在漏检、错检、低效等问题,因此寻求一种高效、规范与智能化的缺陷检测与识别方法显得尤为重要<sup>[2]</sup>。

焊接缺陷检测的方法已经被许多研究者进行了研究,有机器学习方法、特征设计法、背景差分法等。第一类<sup>[3-4]</sup>中,首先需要收集缺陷和非缺陷区域,并提前确定这些缺陷类型,然后通过机器学习的方法训练指定缺陷的特征,实现

缺陷的分类。通过分类器,可以检测出特定类型的缺陷。第二类<sup>[5-6]</sup>同第一类一样,也需要人工选择特定类型缺陷的某些相似性纹理特征,并通过特征匹配算法从工业图像中检测出感兴趣的缺陷。前两类方法只能用来检测训练过的某些类型缺陷,不能应用于没有训练过的某些类型的缺陷或者特征与预先指定学习的特征不同的缺陷。第三类背景差分法是焊缝缺陷提取最常用的算法之一,王家晨等<sup>[7]</sup>采用快速 ICA 算法重构含有缺陷的焊缝图像的背景区域,Chen 等<sup>[8]</sup>直接用无缺陷焊缝图像作为训练样本,采用字典学习方法重构新的焊缝图像。但提出的算法复杂,计算量大,且前期需要人为挑选具有代表性的无缺陷样本图像,算法的整体灵活性较差;周健<sup>[9]</sup>和刘想<sup>[10]</sup>都使用灰度形态学方法重建背景,前者用迭代阈值分割处理差值图像得到二

收稿日期:2022-03-01

\* 基金项目:国家自然科学基金(61801438)、山西省高等学校科技创新项目(2020L0282)、山西省自然科学基金(201901D111161)项目资助

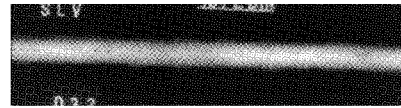
值化缺陷图像,后者利用 Otsu 自动阈值法得到二值化图像,此方法虽然能较完整地将圆形气孔缺陷分割出来,但对于对比度不高的条形缺陷,在分割后易出现伪缺陷以及部分缺陷信息丢失等情况;沈祯杰等<sup>[11]</sup>提出的基于概率的背景重构算法、李超等<sup>[12]</sup>和 Liao 等<sup>[13]</sup>利用混合高斯模型提出的改进背景差分法都是利用图像序列构建背景并实现更新,且必须保证检测的图像和建立背景模型的图像序列规格一致;Shao 等<sup>[14]</sup>采用均值滤波器对焊缝图像进行平滑得到焊缝背景,然后采用背景相减法得到缺陷图像,该方法需要人为设定滤波大小,它的大小影响背景估算的效果及后续缺陷分割的准确性。

针对上述方法的优缺点,本文结合已有研究成果,从背景估计的角度提出一种基于背景估计与边缘梯度抑制的焊缝缺陷检测方法。首先针对传统缺陷检测对整个图像进行处理效率低的问题,提出了基于掩膜图像的焊缝区域提取算法,后续缺陷检测只需在焊缝区域内进行;然后在缺陷检测时,利用背景估计结合形态学滤波显著性检测增强缺陷,抑制背景,并通过多方向多级梯度进一步抑制差分图像的边缘处由于局部起伏较大带来的误检问题;最后利用自适应阈值分割二值化,提取出真实的待检测缺陷。

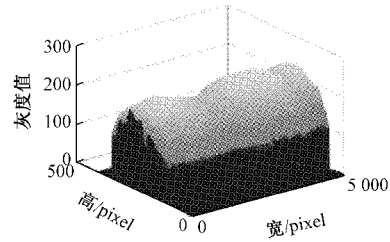
### 1 本文方法

实际焊缝图像包含背景区域和焊缝区域,缺陷存在于焊缝区域,由于焊缝图像在采集时受到光照和表面反射的影响,所以背景会存在一些较暗的阴影区域。焊缝图像如图 1(a)所示,包含缺陷、正常焊缝区域和阴影区域,图 1(b)为对应的三维灰度值分布图。

由图 1(b)可知,焊缝图像的灰度值基本上分布在 170~



(a) 焊缝图像



(b) 灰度值分布图

图 1 焊缝图像及其灰度分布

235 之间,分布相对平缓,缺陷的灰度值会突然降低,要低于背景灰度值,背景灰度值不一定具有相同的灰度值范围,一些背景区域可能更暗,其灰度值可能与缺陷灰度值重叠,所以一般的阈值分割很难将缺陷从背景图像中提取出来。因此,本文提出了一种基于背景估计的缺陷检测算法,克服了焊缝区域背景不均匀的情况。具体步骤如下:

- 1)对原始图像进行 Otsu 分割获的掩膜图像提取焊缝区域<sup>[15]</sup>;
- 2)采用中值滤波背景估计,反背景差分获得含有缺陷的差分图像,并利用形态学检测凸显缺陷;
- 3)利用多方向多级梯度抑制差分图像焊缝区域边缘部分;
- 4)对步骤 3)所得图像使用自适应阈值分割方法将缺陷区域二值化。

本文算法流程如图 2 所示。

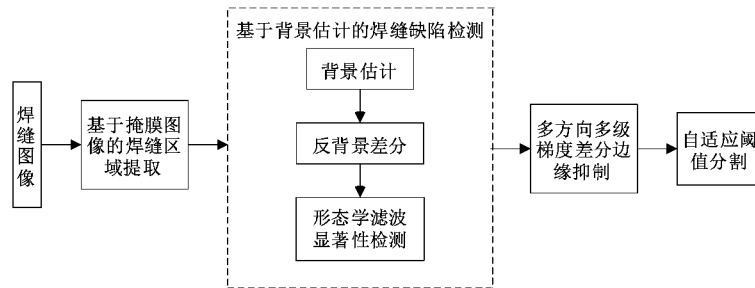


图 2 本文算法流程

#### 1.1 基于掩膜图像的焊缝区域提取

为减少处理焊缝图像时的计算量和提高系统实时性,同时避免因焊缝区域外其他区域干扰而产生不必要的误检,需提前提取焊缝区域。根据焊缝区域与背景区域灰度值差别较大的特征,本文利用阈值分割改进提出了一种基于掩膜图像的焊缝区域提取算法。实现过程如下:

- 1)图像增强:利用  $\sin$  函数增强焊缝图像  $S$ ;
- 2)二值化:Otsu 分割  $S$  获得二值化图像  $B$ , Otsu 方法的优点之一是阈值的自适应性,能够动态改变不同图像的

强度阈值,以获得最佳的图像分割结果;

- 3)获取最大连通域:利用 8 邻域边界跟踪算法提取  $B$  中所有连通域的轮廓,对比每个轮廓大小,将小于最大轮廓的连通域像素值设为 0,即黑色,剩下的白色连通域即为最大连通域  $L$ ;
- 4)获得掩膜图像:利用最小外接矩形获得  $L$  的倾斜角度,计算出旋转角度,然后利用仿射变换实现倾斜校正,倾斜校正后的二值化图像即为掩膜图像  $M$ ,校正后的原图为  $T$ ;
- 5)获得焊缝区域:利用掩膜图像  $M$  的外接矩形获得对

应的倾斜校正后的原图  $T$  的感兴趣焊缝区域  $ROI$ 。

### 1.2 基于背景估计的焊缝缺陷检测

考虑到焊缝区域内背景与缺陷对比度低和图像本身的灰度分布特性,改进提出了一种基于背景估计的缺陷提取算法,抑制背景的同时凸显缺陷。背景差分是用原图减去背景图像,而反背景差分是用背景图像减去原图<sup>[16]</sup>。与传统动态目标检测背景模型更新方式不同,本算法对每幅图像需要重新估计背景,且估计方式简单,建立的背景最大限度接近原图。算法包含背景估计、差分运算和形态学滤波显著性检测 3 个步骤。

#### 1) 背景估计

为使建立的背景更加接近原图,焊缝区域采用中值滤波估计背景,因为中值滤波的中值通过数据排序得到,不受极端值影响。

在中值滤波背景估计过程中,滤波大小的选取至关重要,它直接影响整个算法的运行时间、估计的背景准确性以及后续缺陷提取的结果。本文通过  $B$  样条曲线拟合极小值点来确定中值滤波的滤波大小。焊缝区域背景估计具体算法如下:

(1)对焊缝图像逐列扫描,采用  $B$  样条曲线对每列灰度曲线进行拟合,缺陷分布于曲线低谷位置,利用一阶差分对灰度曲线进行极小值的提取;

(2)通过去除曲线二阶差分中的拐点进行极值点修正;

(3)判断每列极小值点个数来确定滤波大小:

当极小值点个数等于 0 时,该列不存在缺陷;当极小值点个数等于 1 时,该列存在一个缺陷,滤波大小  $d = x_b - x_a - 1$ ;若  $d$  不为奇数,则  $d = x_b - x_a + 1$ ;其中  $x_a$  为曲线开始陡降点的列坐标值,  $x_b$  为曲线向右搜索离极小值点最近

的顶端;当极小值点个数大于 1,该列至少存在两个缺陷,确定每个缺陷对应的滤波大小,选取最大值作为该列最终的滤波大小;

(4)比较各列滤波大小,选取最大值作为中值滤波的滤波大小;

(5)确定中值滤波背景估计的滤波大小后,焊缝区域估计的背景为:

$$B(x, y) = \text{Median}(ROI(x, y)) \quad (1)$$

式中:  $B(x, y)$  是焊缝区域估计的背景。

#### 2) 反背景差分

为了更好地突显和获取焊缝区域中的缺陷,将建立的背景图像与焊缝区域进行差分操作,得到差分图像。焊缝区域  $ROI(x, y)$  与背景  $B(x, y)$  的差分运算公式为:

$$\Delta I(x, y) = B(x, y) - ROI(x, y) \quad (2)$$

式中:  $\Delta I(x, y)$  为差分图像。

由式(2)可得,当估计的背景足够接近无缺陷的图像时,差分图像中的完好区域灰度值基本为 0,基本避免了焊缝区域背景不均匀造成缺陷检测困难的问题。

#### 3) 形态学滤波显著性检测

由于算法是根据焊缝区域建立一个新的背景图像,而建立的背景不能反映局部区域的变化,所以会出现由背景误差引起的错误检测。为了消除误检和提高所得图像的质量,本文采用开运算对缺陷区域进行二次处理,在不明显改变原图像面积的情况下,将原图像中表示噪声和边缘的像素点进行消除和分离。由于焊缝缺有气孔等圆形缺陷和裂纹等线形缺陷,因而首先使用圆形的结构元进行开运算,再使用长条形的结构元进行开运算。

以图 1(a)为样本,缺陷检测结果如图 3 所示,图 1(a)校正角度为  $1.32^\circ$ 。

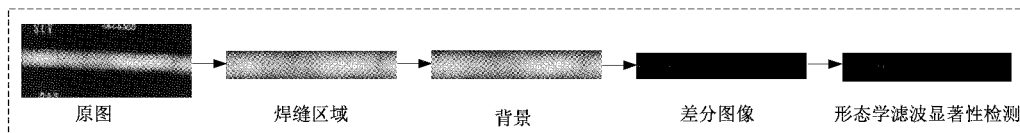


图 3 基于背景估计的缺陷检测流程图

### 1.3 多方向多级梯度差分边缘抑制

根据缺陷区域在所有方向上均具有高梯度(当缺陷位于背景边缘时,将改变这种梯度特性)的特点,边缘背景残余区域仅在某些方向上具有高梯度的特点,可采用多方向梯度去除残余背景区域,由于残余区域可能是 1 到几个像素点,所以要利用多极梯度来判断,以适应不同的大小,由此提出了多方向多级梯度的差分边缘抑制算法。8 方向梯度如图 4 所示。

实现过程如下:

1)计算背景估计后缺陷检测图像在 8 个方向邻域点的梯度值:

$$\Delta x_{i(i=1,2,3,4,5,6,7,8)} = |X(m, n) - X(m_{ki}, n_{ki})| \quad (3)$$

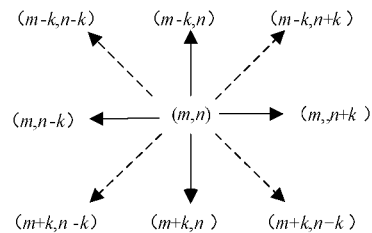


图 4 8 方向梯度图

其中,  $X(m_{ki}, n_{ki})$  表示点  $X(m, n)$  在梯度级为  $k$  时  $i$  方向处的灰度值大小,  $\Delta x_i$  表示在  $i$  方向处的梯度值大小。

2)根据式(3)分别求出  $k$  为 1,3,5 时的 8 方向梯度值;

3)计算每个梯度级对应的阈值,作为梯度变化的度量;

$$T_i = m_i + \alpha\sigma_i \quad (4)$$

式中:  $m_i$  为均值,  $\sigma_i$  为方差,  $\alpha$  为系数, 一般取 1/4。

4) 分别对不同梯度级的方向梯度做统计, 对于同一梯度级的 8 个方向梯度, 如果其中有 6 个以上的梯度值大于阈值, 则可能为缺陷的记录数加 1; 3 个梯度级统计完成后, 如果记录数结果  $\geq 2$ , 且随着梯度数的增加各方向梯度

的绝对值呈增大趋势, 则判定该区域为缺陷区域, 灰度值保持不变, 否则灰度值设为 0。背景估计后缺陷检测图像灰度值按以下公式规则来改变:

$$\Delta I(x, y) = \begin{cases} 0, & n < 6 \\ \Delta I(x, y), & 6 \leq n \leq 8 \end{cases} \quad (5)$$

基于多方向多级梯度的缺陷检测结果如图 5 所示。

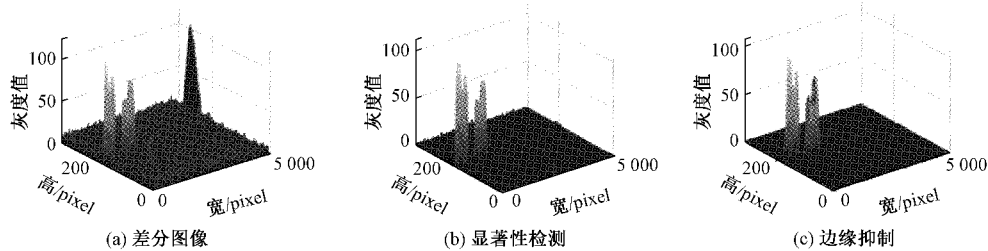


图 5 基于多方向多级梯度的缺陷检测结果

由图 5(a)、(b)可知, 通过使用背景估计与形态学滤波显著性检测, 较好地抑制了背景, 同时增强了缺陷。由图 5(b)与(c)相比可以看出, 通过多方向多级梯度的差分图像边缘抑制, 边缘残余区域被去除, 达到了缺陷与背景分离的目的。

#### 1.4 自适应阈值分割

由于通过背景估计提取出的缺陷灰度值变换不明显, 所以可以对经过多方向多级梯度抑制的差分图像通过自适应阈值分割进行凸显。本文的自适应阈值分割规则如下:

$$B(x, y) = \begin{cases} 255, & |R(x, y) - \mu| > K\sigma \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $R(x, y)$  表示边缘抑制后图像,  $B(x, y)$  表示二值化结果。 $\mu$  和  $\sigma$  分别为  $R(x, y)$  的像素均值和标准差,  $K$  为阈值控制参数。

## 2 实验及分析

本文的实验环境为 Intel(R) Core(TM) i7-10700U、VS2013、MatlabR2018a。使用的 x 射线图像是从一个名为 GDXray<sup>[17]</sup> 的公共数据库中获得的, 使用的是数据库中的组“Weld”。本组共 88 张图片, 按 3 个系列排列。这些 x 射线图像的收集是由德国柏林 BAM 联邦材料研究和测试研究所拍摄的, 大小约为  $5\,000 \times 1\,200$ , 其中包含气孔、未焊透、裂纹、夹渣等缺陷。

### 2.1 评估指标

为验证本文算法性能, 引入召回率(recall rate)  $Rc$ 、准

确率(precision rate)  $Pr$  和  $F\_score$  3 个评价指标进行定量分析对比, 它们是模式识别和信息检索等领域最常用的指标, 用来综合评价焊缝缺陷的识别、分类等检测结果,  $F\_score$  是精确率和召回率的一种调和形式。定义如下:

$$Rc = \frac{TP}{TP + TN} \times 100\% \quad (7)$$

$$Pr = \frac{TP}{TP + FP} \times 100\% \quad (8)$$

$$F\_score = 2 \times \frac{Rc \times Pr}{Rc + Pr} \times 100\% \quad (9)$$

式中:  $TP$  为正确识别个数,  $FP$  为错误识别个数,  $TN$  为正确未识别个数。

### 2.2 实验结果分析

为验证本文背景估计算法和整体缺陷检测算法的有效性, 分两组试验进行对比分析。

#### 1) 背景估计算法缺陷检测实验结果及分析

为验证本文背景估计算法的优势, 从数据集中选取 4 组焊缝图像进行实验, 焊缝原图如图 6 所示。将本文所提背景估计算法在 4 幅不同的焊缝图像的缺陷检测结果与现有的两种背景估计算法进行对比, 其中包括传统的形态学滤波和均值滤波。常用的背景估计法流程为: 对原图应用大模板滤波得到模拟的焊缝背景图像, 然后将原图减去其背景图像得到只含缺陷的差分图像。4 组焊缝图像测试数据集详细信息如表 1 所示。图 6 对应的焊缝区域三维灰度分布图如图 7 所示, 图 6 对应的不同背景估计算法的缺陷检测结果三维灰度分布图如图 8~10 所示。

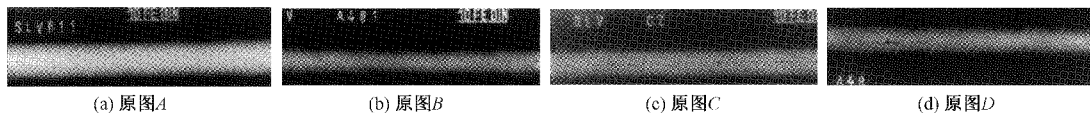


图 6 原图

通过对比不同算法的缺陷检测结果可以看出, 无论是第 1 幅和第 3 幅较为平滑的高亮背景, 或是第 2 幅和第 4

幅受背景不均匀和噪声干扰, 传统的两种算法在焊缝边缘处背景估计不太准确, 虽然对背景具有一定的抑制能力,

表 1 4 组焊缝图像测试数据集详细信息

图像序列	图像/pixel	缺陷类型	背景描述
A	4 992×1 284	裂纹	均匀
B	4 992×1 244	裂纹、气孔	不均匀
C	4 992×1 285	未焊透、气孔	均匀
D	4 992×1 224	裂纹、气孔	不均匀

但是容易在焊缝边缘处产生误检,因此不能单独使用此方法来检测缺陷,影响后续缺陷分割;而本文提出的算法对背景有较好的抑制作用,同时能够有效增强缺陷,使得最终得到的缺陷更加突出,从而易于检测,得到最终正确的缺陷位置。

2) 差分图像二值化实验结果及分析

由于本算法的重点为背景估计及二值化部分,为突出

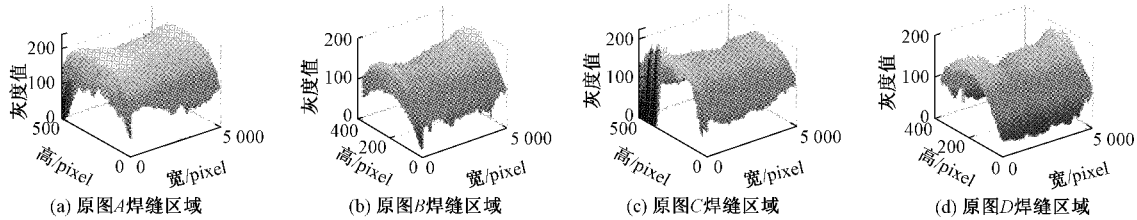


图 7 焊缝区域三维灰度分布图

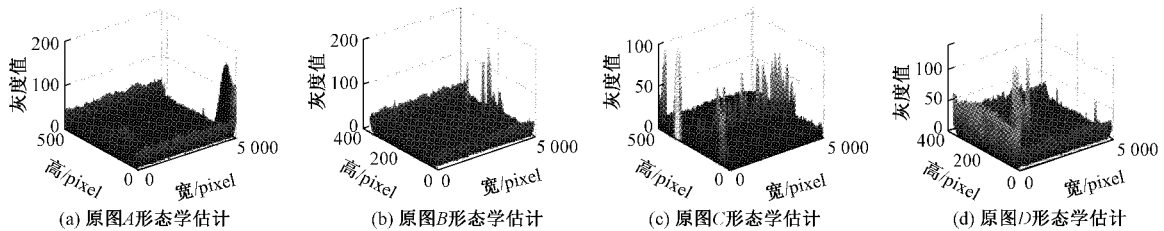


图 8 形态学背景估计三维灰度分布图

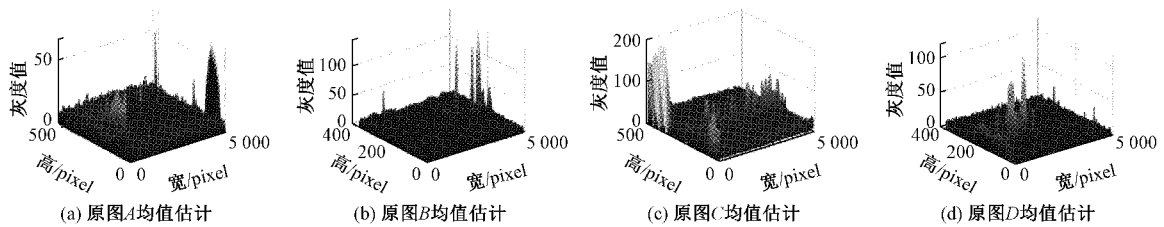


图 9 均值背景估计三维灰度分布图

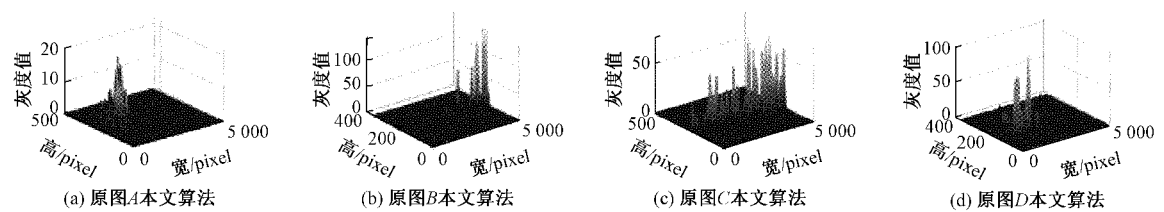


图 10 本文算法背景估计三维灰度分布图

此部分算法优势,将本文所提的背景估计算法及二值化方法与文献[9]、[10]、[14]3种不同的背景估计及二值化方法与进行对比。文献[9]与[10]都采用形态学进行背景估计,前者利用迭代阈值分割二值化,后者利用 Otsu 二值化,文献[14]使用均值滤波来估计背景。使用数据集的 4 组不同图片进行实验,焊缝原图如图 11 所示,其中 A 包含夹渣、气孔缺陷, B 包含裂纹和对比度高的气孔、夹渣缺陷, C、D 包含低对比度未焊透和气孔缺陷。不同缺陷检

测方法结果对比如图 12~15 所示。

由图 12~15 的各种算法二值化结果可看出,文献[9]和[10]都是对形态学背景拟合后的差分图像二值化,文献[9]二值化通过对整幅差分图像迭代寻找最佳分割阈值,当背景中某些区域灰度值和缺陷区域灰度相近时,将会将此区域误判为缺陷,如图 12(a)中存在大量误检区域,表明该算法易受背景分布不均匀影响,同时图 14(a)中贯穿整图的未焊透缺陷和图 15(a)中位于图像左边的未焊透

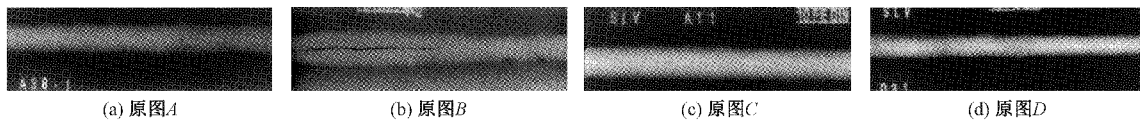


图 11 原图



图 12 原图 A 不同算法检测结果



图 13 原图 B 不同算法检测结果



图 14 原图 C 不同算法检测结果



图 15 原图 D 不同算法检测结果

缺陷未检测到,表明文献[9]算法对于一些对比度较低的缺陷分割效果不理想;文献[10]使用 Otsu 分割确定最终的分割阈值,阈值是通过寻找前景与背景图像类间最大方差所确定,图 14(b)、15(b)在焊缝区域边缘处检测到较多非缺陷部分,表明该算法二值化结果易受背景的边缘部分影响,且对于对比度低的线型缺陷分割效果较差;文献[14]使用均值滤波背景估计,该算法可以有效分割出缺陷主体部分,但分割结果不够精细,会检出微弱伪缺陷,图 12(c)~15(c)中缺陷整体部分已检测出,但是部分微小非缺陷区域造成误识别;本文算法通过中值滤波背景估计以及边缘梯度抑制,使得最终得差分图像具有了均匀背景及缺陷增强特性,削弱了焊缝区域背景不均匀造成的影响,由图 12(d)~15(d)检测结果可看出,本文算法不易受缺陷对比度低和背景不均匀影响,对非缺陷像素有较低的误判,分割后结果更接近缺陷真实情况。

不同焊缝缺陷检测方法的性能指标对比如表 2 所示。三者指标越高,表明算法检测结果更准确,算法优势更明显。

分析表 2 各算法二值化图像对应的  $R_c$ 、 $Pr$  及  $F\_score$  结果可见,文献[9]和[10]总体指标偏低是由于两者对于对比度低的缺陷检测结果不理想,而文献[14]指标略高于前两者,对于对比度低的缺陷检测效果有所提升,但误检区域也相对增加。而本文算法二值化图像的  $R_c$ 、 $Pr$  及

表 2 不同方法焊缝缺陷检测的性能指标对比 %

方法	$R_c$	$Pr$	$F\_score$
文献[9]	33.57	36.42	34.94
文献[10]	52.48	57.86	55.04
文献[14]	87.48	67.86	76.43
本文算法	91.90	90.95	91.42

$F\_score$  均优于其他方法,这是由于本文算法为了能够有效检测出低对比度缺陷区域,对图像灰度值更加敏感,使缺陷区域得到凸显的同时降低非缺陷区域对整体检测过程的影响。

根据上述缺陷检测方法结果及性能指标对比可看出,本文所提出的基于背景估计的焊缝缺陷检测方法优于另外三种现有算法。

### 3 结 论

针对焊缝图像具有亮度不均匀、缺陷对比度低等难点,本文提出了基于背景估计的焊缝缺陷检测方法。该方法具有以下优点:

利用掩膜图像来提取焊缝区域,后续缺陷检测过程只需在单独提取出的焊缝区域内进行,不需要对整个图像处理,减少了处理图像时的计算量;利用背景估计和多方向多级梯度差分边缘抑制,达到了抑制背景、增强缺陷

的目的,极大地消除了亮度分布不均匀及噪声带来的干扰。

本文提出方法不仅可用于X射线图像中的焊缝缺陷检测,还可用于钢轨表面的缺陷检测,以及其他工业领域中的缺陷检测。由于本文只考虑了缺陷的提取,分割后的二值化图存在某些缺陷粘连在一起,不能单独分割等问题,这将是下一步研究的内容。

### 参考文献

- [1] 陈强. 基于机器视觉的钢板焊缝缺陷检测方法研究[D]. 浙江:浙江工业大学,2012.
- [2] 郭延龙,郭慧,蔡剑,等. 焊缝X射线图像缺陷检测技术[J]. 东华大学学报(自然科学版),2011,37(4):487-471.
- [3] BOARETTO N, CENTENO T M. Automated detection of welding defects in pipelines from radiographic images DWDI [J]. NDT & E International, 2016, 86(3):7-13.
- [4] KALSISELVI V, ARAVINDHAR D J. An efficient weld image classification system using wavelet and support vector machine [C]. 2019 3rd International Conference on Computing and Communications Technologies (ICCCCT), IEEE, 2019.
- [5] 高炜欣,胡玉衡,武晓朦,等. 埋弧焊X射线焊缝缺陷图像分类算法研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(3):518-524.
- [6] JIANG H, ZHAO Y, GAO J, et al. Weld defect classification based on texture features and principal component analysis [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2016, 58(4):194-200.
- [7] 王家晨,王新房. 基于背景重构X射线钢管焊缝缺陷检测方法[J]. 计算机系统应用,2018,27(2):245-249.
- [8] CHEN B Z, FANG Z H, XIA Y, et al. Accurate defect detection via sparsity reconstruction for weld radiographs[J]. NDT & E International,2018,94(1):62-69.
- [9] 周健. 基于X射线实时成像的铝合金激光焊接缺陷识别技术研究[D]. 江苏:南京航空航天大学,2016.
- [10] 刘想. 基于X射线图像的输油管道焊缝缺陷检测与识别[D]. 成都:电子科技大学,2016.
- [11] 沈祯杰,孙俊,廖志超. 基于背景差分法在焊缝缺陷检测中的应用[J]. 无锡职业技术学院学报,2014,13(2):36-40.
- [12] 李超,孙俊. 基于机器视觉方法的焊缝缺陷检测及分类算法[J]. 计算机工程与应用,2018,54(6):264-270.
- [13] LIAO Z, SUN J. Image segmentation in weld defect detection based on modified background subtraction [C]. 2013 6th International Congress on Image and Signal Processing (CISP), IEEE, 2014.
- [14] SHAO J X, DU D, CHANG B H, et al. Automatic weld defect detection based on potential defect tracking in real-time radiographic image sequence [J]. NDT & E International, 2011,46(1):14-21.
- [15] 阙禄松,王明泉,李汉,等. 基于Canny算子和形态学滤波的焊缝图像背景去除技术[J]. 国外电子测量技术,2020,39(1):10-14.
- [16] 吴京城,洪欢欢,施露露,等. 反背景差分结合Otsu的细胞图像分割方法[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(4):82-89.
- [17] MERY D, RIFFO V, ZSCHERPEL U, et al. GDXray: The database of X-ray images for nondestructive testing [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2015,34(4):1-12.

### 作者简介

张小琳,硕士研究生,主要研究方向为X射线图像处理、缺陷检测。

E-mail:1656599506@qq.com

刘祎,副教授,硕士生导师,主要研究方向为医学图像处理与重建等。

E-mail:liuyi@nuc.edu.cn

白贇泓,硕士研究生,主要研究方向为图像处理、图像融合。

E-mail:1249542497@qq.com

桂志国,教授,博士生导师,主要研究方向为医学图像处理与重建等。

E-mail:guizhiguo@nuc.edu.cn