Application of Improved Sobel Operator in X-Ray Images of Drilling Mast Welds

QIAN Wenjun*, WANG Jixin, DU Haoran, ZHANG Xunan
(School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130025, China)

Abstract: To facilitate accurate identification of weld seam defects in drill masts, more effective edge detection of their radiographic images is required. Consequently, a multi-scale Sobel operator method based on adaptive thresholding is proposed. By analyzing the structure and operational principles of rotary drilling rigs and integrating finite element analysis, the critical areas of the weld seams are identified. To enhance the accuracy of weld seam defect detection, Gaussian filtering and linear enhancement are initially applied for the preprocessing of X-ray images, followed by image binarization using the Otsu's thresholding method. Considering the potential limitations of this global thresholding approach, the Bradley and Roth adaptive thresholding technique is further incorporated along with the multi-scale Sobel operator for edge detection of X-ray images. Experimental results demonstrate that the improved Sobel operator significantly enhances edge detection performance.

Key words: rotary drilling rig; edge detection; adaptive threshold; X-ray inspection; weld seam
EEACC: 6135 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.03.016

改进 Sobel 算子在钻桅焊缝 X 射线图像中的应用

钱文君*, 王继新, 杜浩然, 张旭楠
(吉林大学机械与航空航天工程学院, 吉林 长春 130025)

摘 要: 为了对钻桅焊缝缺陷进行合理识别, 需要对其射线图像进行更加有效的边缘检测。因此, 提出了一种基于自适应阈值的多尺度 Sobel 算子方法。通过对旋挖钻机的结构和工作原理进行分析, 结合有限元分析确定了焊缝的关键区域。为了提高焊缝缺陷检测的准确性, 首先采用高斯滤波和线性增强对 X 射线图像进行预处理, 随后应用 Otsu's 阈值分割法进行图像二值化分割。考虑到这种全局阈值处理可能存在的不足, 进一步引入了 Bradley 和 Roth 自适应阈值技术, 结合多尺度 Sobel 算子, 对 X 射线图像进行边缘检测, 实验结果表明, 改进的 Sobel 算子在边缘检测效果上有显著提升。

关键词: 旋挖钻机; 边缘检测; 自适应阈值; X 射线检测; 焊缝
中图分类号: TG441.7 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)03-0589-07

随着国际上城市化进程的普遍加快和世界人民环保意识的不断增强, 国内外对于大型基础设施项目的需求日益增多, 对于施工质量和施工过程中的环境友好性要求日益提高。现代工程面临的地质条件复杂多变, 因此, 适应多种地质条件、施工高效、环境影响小的旋挖钻机成为了目前桩基工程的理想选择[1]。旋挖钻机是一种大型的桩基工程机械, 通过旋转进入地面, 驱动钻杆与钻头对土壤进行钻掘, 以形成所需直径和深度的桩孔, 广泛应用于高层建筑、桥梁、水坝和海港等基础建设项目中。

1 钻桅 X 射线焊缝图像的采集

旋挖钻机桅杆是旋挖钻机的核心组件, 承担着支撑和引导钻杆及钻头进行钻探作业的关键职能[2]。桅杆的质量优劣对旋挖钻机的操作安全、效率和精确度具有直接影响, 其具体结构如图 1 所示。

有限元分析是一种计算机模拟技术, 可以预测结构在外力作用下的响应[3]。作为大型工程机械的一部分, 钻桅上存在各种各样的焊缝, 其中对钻桅寿命影响最大的是应力变形最集中、最易遭受破坏的焊缝的焊接质量。因此, 要评估旋挖钻机的焊缝缺陷, 必须首先利用有限元分析技术分析钻桅模型, 以识别最脆弱的焊缝位置[4], 然后针对该位置制备相应的样件。有限元分析结果如图 2 所示。

通过有限元分析, 可以发现旋挖钻机在钻进和提钻过程中的最大应力和变形发生在大圆盘焊缝处。基于这一发现, 选择在大圆盘焊缝位置制备试验样件, 考虑到工程实际情况, 样件的尺寸最终定为底板长度 400 mm, 底板宽度 40 mm, 底板厚度 8 mm, 立板高度 50 mm, 立板宽度 40 mm。大圆盘焊缝样件制备情况如图 3 所示。

收稿日期: 2024-03-30 **修改日期**: 2024-04-22

X 射线是一种波长非常短的电磁波，能够穿透大部分物质。由于不同材料对 X 射线的吸收程度不同，因此可以通过 X 射线检测来识别和评估物体内部的裂纹、孔洞、夹杂物和气泡等缺陷[5]。X 射线检测可以提供清晰的检测样件内部结构图像，由于 X 射线检测方法无需与被检测样件直接接触，因此不会对检测对象造成物理损伤[6]。X 射线检测安全可靠，检测速度快，能够提供实时检测结果，非常适合对本次的大圆盘焊接接头样件进行检测[7]。本次试验选用的是丹东新科的 XXG1605D-XK3.3 便携式 X 射线探伤机，利用 X 射线检测试验，可以得到旋挖钻机大圆盘焊缝处的 X 射线检测图像，根据图像进行进一步处理即可对焊缝的缺陷情况进行判断，试验具体流程情况如图 4 所示。

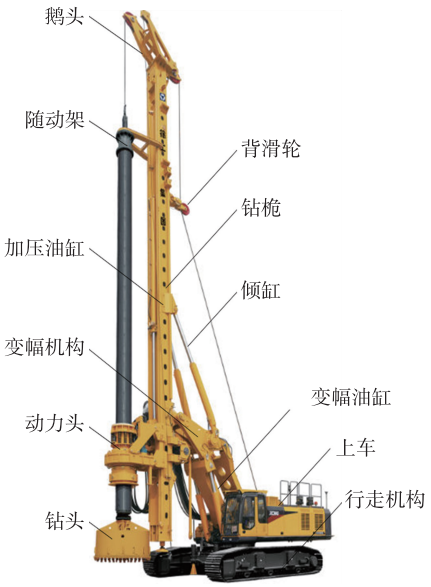


图 1 旋挖钻机结构图

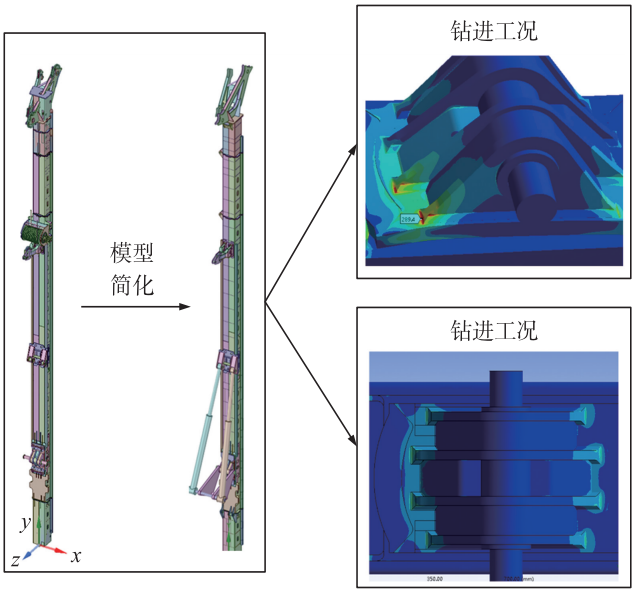


图 2 钻桅有限元分析结果图

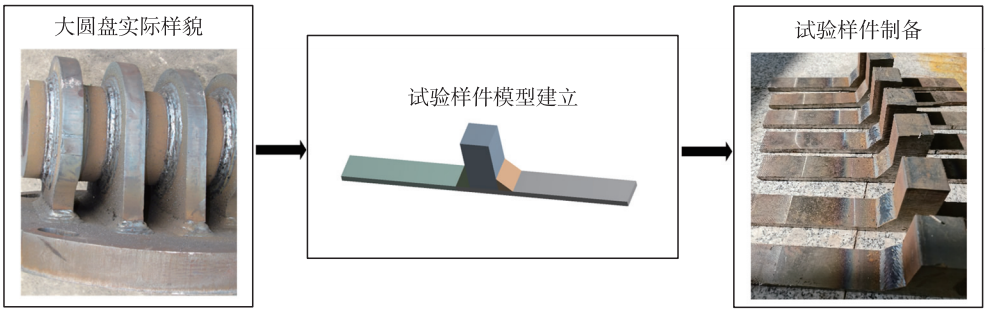


图 3 大圆盘焊缝样件制备图

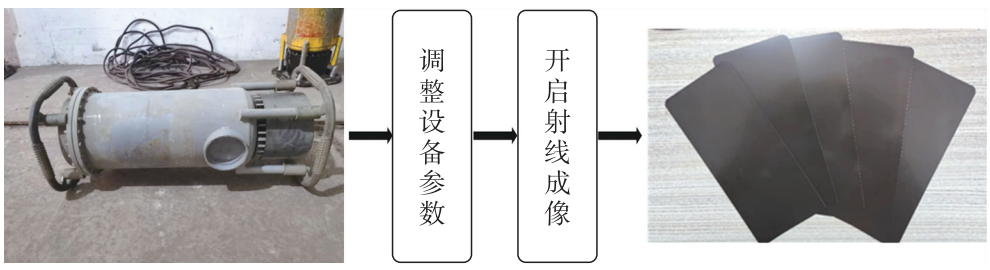


图 4 X 射线试验流程示意图

2 钻桅 X 射线焊缝图像的滤波与增强

X 射线图像在采集、传输过程中容易受到多种因素的影响，如设备的物理限制、环境干扰等，这些因素可能会在图像中引入噪声，进而干扰图像的清晰度和质量[8]。噪声具有无法预知的特点，可以被看作是随机误差。这些噪声的存在不仅使得图像细节模糊，还可能干扰边缘检测算法的正确执行，导致边缘识别不准确。因此，需要通过滤波处理，有效地移除或减少这些噪声，保留图像的

重要特征和细节,为后续的图像边缘检测工作打下坚实基础[9]。

常用的滤波方法有均值滤波,高斯滤波,中值滤波等,本文选择采用边缘保持性好,噪声抑制能力强的高斯滤波[10]。滤波前后的图像如图 5 所示。

由于 X 射线图像的对比度往往较低,导致图像看起来平坦,细节不够突出,可能会降低对边缘检测和图像识别的准确性。因此,通过图像增强技术,可以显著提高图像中感兴趣区域的可见性,突出重要的边缘信息,从而提高后续图像处理步骤的有效性。本文选择使用简单高效、应用广泛的线性增强方法[11],线性增强前后的图像情况如图 6 所示。

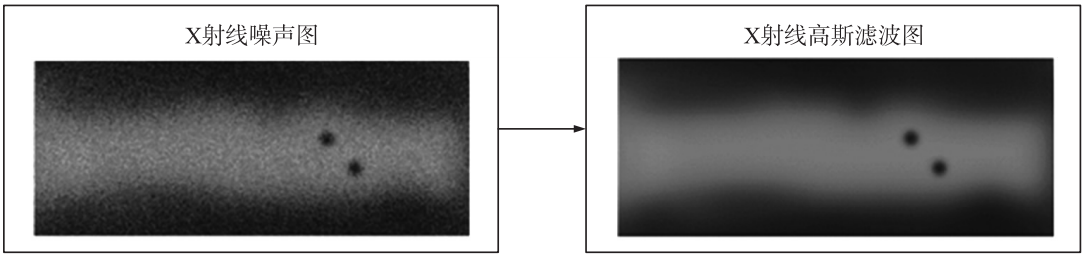


图 5　高斯滤波效果图

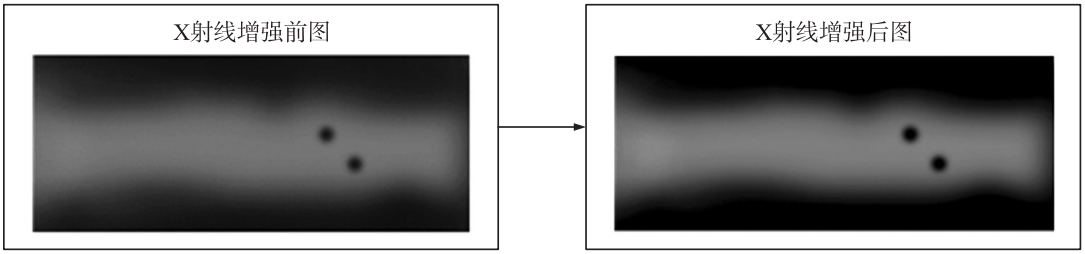


图 6　线性增强效果图

3　钻桅 X 射线焊缝图像的边缘检测

边缘检测是数字图像处理中的一种常用技术,目的是识别图像中明亮度变化显著的点,也就是图像的边缘。边缘检测是其他图像分析操作的基础,通过识别出图像中的边缘,可以进一步进行物体识别和图像分割,将感兴趣的物体从背景中分离出来,便于进行后续的操作[12]。

3.1　钻桅 X 射线焊缝图像二值化

为了简化边缘检测过程,突出边缘信息,减少非关键信息的干扰,需要先对焊缝检测图像进行阈值分割。阈值分割是数字图像处理中的一种基本技术,它将图像的像素根据其灰度值分为若干个类别。一般来说,阈值分割会通过选择一个灰度阈值,把图像分成背景和前景。在各种阈值分割方法中,由大津展之提出的 Otsu's 阈值分割法具有简单高效、鲁棒性好、适用范围广的优点[13],因此本文选择 Otsu's 阈值分割法对钻桅大圆盘焊缝 X 射线检测图像进行全局阈值分割。

设图像中灰度值 i 对应的像素数量为 n_i,且灰度值界限设定在[0,L−1]之间,定义为集合 G\{0,1,2,3,…,L−1\},当像素的总数为 N 时,各灰度值 i 出现的频率定义为 P_i,则有:

$$\begin{cases} N = \sum_{i=0}^{L-1} n_i \\ P_i = \dfrac{n_i}{N} \\ \sum_{i=0}^{L-1} P_i = 1 \end{cases} \tag{1}$$

利用阈值 T,图像的像素可以被划分成 C_0 和 C_1 两个集合,C_0 包括所有灰度值位于[0,T−1]范围内的像素,而 C_1 含有所有在[T,L−1]范围的像素,则像素出现在 C_0 和 C_1 区域的概率分别是:

$$\begin{cases} P_0 = \sum_{i=0}^{T-1} P_i \\ P_1 = \sum_{i=T}^{L-1} P_i \end{cases} \tag{2}$$

则 C_0 和 C_1 两个区域的平均灰度分别为:

$$\begin{cases} \mu_0 = \dfrac{1}{P_0} \sum_{i=0}^{T-1} iP_i \\ \mu_1 = \dfrac{1}{P_1} \sum_{i=T}^{L-1} iP_i \end{cases} \tag{3}$$

则整张图像的灰度均值为:

$$\mu = \sum_{i=0}^{T-1} iP_i + \sum_{i=T}^{L-1} iP_i = P_0\mu_0 + P_1\mu_1 \tag{4}$$

则区域 C_0 的方差为:

$$\sigma_0^2=\sum_{i=0}^{T-1}(i-\mu_0)^2\frac{P_i}{P_0} \tag{5}$$

则区域 C_1 的方差为：

$$\sigma_1^2=\sum_{i=T}^{L-1}(i-\mu_1)^2\frac{P_i}{P_1} \tag{6}$$

则两区域的类内方差之和与类间方差分别为：

$$\begin{cases}\sigma_\omega^2=P_0\sigma_0^2+P_1\sigma_1^2\\ \sigma_B^2==P_0P_1(\mu_0-\mu_1)^2\end{cases} \tag{7}$$

接下来，逐个尝试阈值 T 在[0,T-1]范围内的每个可能值，当类间方差 σ_B^2 达到最大时，认为阈值分割达到最优状态，此时的分割阈值为：

$$T=\arg_{t\in\{0,1,\cdots,L-1\}}\max[\sigma_B^2] \tag{8}$$

通过上述流程，可以得到钻桅大圆盘焊缝的二值化 X 射线图像，如图 7 所示。

图 7 Otsu's 法二值化效果图

3.2 基于自适应阈值多尺度 Sobel 算子的 X 射线图像边缘检测

Sobel 算子是一种从不同方向进行边缘检测的算子[14]，具体来说，Sobel 算子通过两个 3×3 的卷积核行和列之间的离散差来计算梯度，一个用来计算水平方向的梯度，另一个用来计算竖直方向的梯度。这两个卷积核的数学表达式分别为：

$$\begin{cases}G_x=\begin{bmatrix}-1&0&1\\-2&0&2\\-1&0&1\end{bmatrix}\\ G_y=\begin{bmatrix}1&2&1\\0&0&0\\-1&-2&-1\end{bmatrix}\end{cases} \tag{9}$$

则边缘强度计算公式为：

$$|G(x,y)|=\sqrt{G_x^2+G_y^2} \tag{10}$$

此公式可以近似简化为：

$$|G(x,y)|=\max(|G_x|,|G_y|) \tag{11}$$

此时边缘方向角度的计算公式为：

$$\theta=\arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \tag{12}$$

常规的 Sobel 算子虽然应用广泛[15]，但是由于其使用了固定大小的核，限制了其对于不同尺度边缘的响应能力，可能无法兼顾图像中的粗大边缘和细小细节，其灵活性和适应性较差。因此，本文引入了一种基于自适应阈值多尺度 Sobel 算子的边缘检测方法。

多尺度 Sobel 算子是对传统 Sobel 算子的扩展[16]，通过在不同的尺度上应用 Sobel 算子，适应各种大小的边缘和细节，从而提高边缘检测的准确性和鲁棒性，在处理具有不同边缘特征的图像时表现更优。多尺度 Sobel 算子的基本原理是在每个尺度上使用类似于标准 Sobel 算子的形式，但是检测算子核的大小和权重会根据尺度的变化而调整，其数学表达式可以表示为：

$$\begin{aligned}G_{xs}&=s_1\cdot G_x\\ G_{ys}&=s_2\cdot G_y\end{aligned} \tag{13}$$

式中：G_{xs} 和 G_{ys} 分别为多尺度 Sobel 算子的水平核和竖直核，s_1 和 s_2 分别为水平和竖直方向上的尺度调节因子，G_x 和 G_y 分别为原始的 Sobel 算子的水平核和竖直核。

在每个选定的尺度上分别应用 Sobel 算子完成检测后，都会产生一个可以用来表示该尺度下图像边缘信息的边缘强度图。将不同尺度上得到的边缘检测结果合并，可以得到一个最终的边缘图，这种合并可以有多种策略，例如采用加权平均和采用最大值合并，这两种策略特点如表 1 所示。

表 1 多尺度 Sobel 算子合并策略

策略名称	策略含义	策略特点
加权平均	将每个尺度的结果根据预定的权重进行加权，然后计算其平均值	边缘平滑，灵活性高，可能会出现边缘特征弱化
最大值合并	选择每个像素位置在所有尺度上检测到的最大边缘强度值作为最终的边缘强度值	边缘突出，简单直观，噪声敏感性相对较高

从表 1 特点可以看出，加权平均适合于需要噪声抑制和细节保留的精细处理场景，而最大值合并则适合于边缘清晰、对速度要求较高或需要突出边缘的应用。由于本文是对钻桅大圆盘焊缝的 X 射线检测图像的缺陷情况进行检测，需要突出边缘特点，且已经经过了滤波操作，因此，本文选择采用最大值合并的策略来进行合并，其数学表达式为：

$$E_f(x,y)=\max_{i\in\{1,2,\cdots,n\}}E_i(x,y) \tag{14}$$

式中：(x,y) 为每个像素点坐标，$E_f(x,y)$ 为最终的边缘图中位于 (x,y) 上像素点的边缘强度值，n 为使用的不同尺度的总数，$E_i(x,y)$ 为在第 i 个尺度上，图像中位于坐标 (x,y) 上的像素点的边缘强度值。

考虑到多尺度 Sobel 算子虽然已经在性能上有

了较大改善,但仍存在一些问题,例如,Otsu's 方法属于全局阈值方法,在不同区域的亮度和对比度差异较大的复杂图像中,多尺度 Sobel 算子缺乏自适应调整的能力;在某些情况下,多尺度 Sobel 算子在某些情况下可能会错过一些微弱的边缘,或者将非边缘区域误识别为边缘。为了解决这些问题,进一步提高边缘适应性、适用性和边缘检测精度,本文进一步提出了基于自适应阈值多尺度 Sobel 算子。

基于自适应阈值的多尺度 Sobel 算子结合了多尺度 Sobel 算子的边缘检测能力和自适应阈值方法的灵活性,在多尺度 Sobel 算子的基础上,对每个尺度上的梯度图,根据图像的局部特性动态计算阈值,使用计算得到的自适应阈值在每个尺度上提取边缘,并将不同尺度上检测到的边缘信息综合起来形成最终的边缘图。可以选择采用的自适应阈值方法有局部阈值法、Sauvola 法、Bradley 和 Roth 方法等,其工作原理如表 2 所示。

表 2　自适应阈值方法表

方法名称	工作原理	方法特点
局部阈值法	根据图像中每个像素周围的邻域的特性来确定该像素的阈值	自适应性高,灵活应用,方法多样
Sauvola 法	根据局部区域的平均亮度和标准差来计算阈值	文本图像专优,局部统计特性,鲁棒性高
Bradley 和 Roth 方法	通过比较像素与其周围区域亮度的平均值来决定是否将其视为前景	实时处理,计算高效,适用性广泛

考虑到 Bradley 和 Roth 方法通过比较每个像素与其周围区域的平均亮度来自适应地调整阈值,这使得算法能够适应图像中的局部亮度变化,非常适合于旋挖钻机焊缝缺陷图像这种不均匀光照条件下拍摄,焊缝缺陷区域与周围材料仅有微妙差异的情况,因此本文选用的自适应阈值方法为 Bradley 和 Roth 方法。

Bradley 和 Roth 方法通过积分图快速计算局部区域的平均亮度,并据此自适应地确定阈值。首先,对原始图像计算积分图。积分图是一种数据结构,可以快速、高效地计算图像任意区域的像素总和,其数学表达式为:

$$S(x,y)=\sum_{i\leqslant x,j\leqslant y} I(i,j) \tag{15}$$

式中:$S(x,y)$为积分图在(x,y)上的数值,$I(i,j)$为原始图像在位置(i,j)的像素值。

然后,对于图像中的每个像素,考虑一个围绕它的矩形窗口。这个窗口的大小是一个预设的参数,决定了局部区域的范围。使用积分图,可以快速计算出每个矩形窗口内的像素值总和,从而得到该局部区域的平均亮度,其计算表达式为:

$$\mu(x,y)=\frac{1}{W\times H}\sum_{i=x-W/2}^{x+W/2}\sum_{j=y-H/2}^{y+H/2} I(i,j) \tag{16}$$

式中:$\mu(x,y)$为局部区域的平均亮度,W 和 H 分别是窗口的宽度和高度,$I(i,j)$为像素点(i,j)的亮度值。

最后,通过比较像素值和局部平均亮度确定阈值并生成最终图像,对于每个像素,将其局部区域平均亮度乘以一个预设的比例因子设定为阈值,其数学表达式为:

$$T(x,y)=\mu(x,y)\times(1-R) \tag{17}$$

式中:$T(x,y)$为图像中位置(x,y)处的阈值,R 为预设的比例因子。

如果其亮度值小于 $T(x,y)$,则该像素被认为是背景;否则,被认为是前景,其数学表达式为:

$$B(x,y)=f(x)=\begin{cases}1 & I(x,y)\geqslant T(x,y)\\ 0 & I(x,y)<T(x,y)\end{cases} \tag{18}$$

式中:$I(x,y)$为原图像在(x,y)位置的亮度值,$B(x,y)$为二值化后图像在(x,y)位置的值,其中 1 代表前景,0 代表背景。

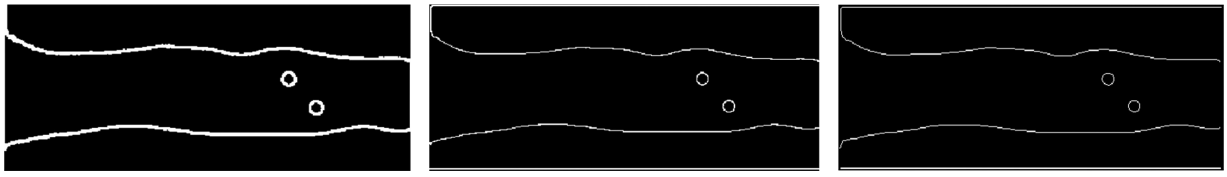
接下来,继续进行多尺度 Sobel 算子检测即可,根据上述内容,可以依次得到经过 Sobel 算子、经过多尺度 Sobel 算子和经过基于自适应阈值的多尺度 Sobel 算子的边缘检测图像结果,如图 8 所示。

3.3　边缘检测算子效果对比

为了对改进后的 Sobel 边缘检测算子的有效性进行检验,仅仅依靠视觉的观察并不可靠,因此,本文利用边缘定位精度和结构相似性系数这两个量化的指标来对其检测效果进行评价。

①边缘定位精度

在进行边缘检测效果判定时,希望检测结果能够尽可能准确地区分出边缘区域和非边缘区



(a) Sobel算子　　(b) 多尺度Sobel算子　　(c) 自适应阈值多尺度Sobel算子

图 8　三种 Sobel 算子边缘检测效果图

域,减少漏检和误检,具有较高的检测精度。通常,研究中会使用边缘定位精度来衡量检测效果的好坏。边缘定位精度指的是算法检测到的边缘位置与图像中真实边缘位置之间的接近程度[17],边缘定位精度数值越低,说明识别结果与实际差距越小,检测效果越好,反之则说明检测效果越差。其计算公式为:

$$\mathrm{MDE}=\frac{1}{|n_d|}\sum_{i=1}^{n_d}\sqrt{(d_{ix}-d_{iy})^2+(g_{ix}-g_{iy})^2} \quad (19)$$

式中:n_d 表示边缘像素个数,d_{ix},d_{iy},g_{ix} 和 g_{iy} 分别表示检测边缘与实际边缘像素的横纵坐标。

将三种 Sobel 边缘检测算子检测结果代入,可以得到边缘检测精度,如图 9 所示。

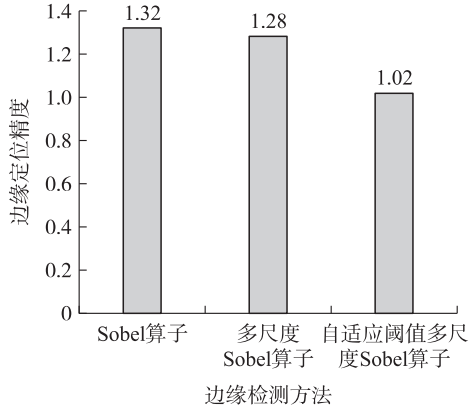


图 9 三种 Sobel 方法边缘检测精度对比图

②结构相似性系数

为了评估边缘检测后图像的边缘保持度,可以利用结构相似性系数 SSIM 计算边缘检测图像与原图的相似性[18]。结构相似性指数越接近于 1,说明图像处理效果越好,结构相似性指数越接近于 0,说明图像处理效果越差,其计算公式为:

$$\mathrm{SSIM}=\frac{(2\mu_x\mu_y+C_1)(2\sigma_{xy}+C_2)}{(\mu_x^2+\mu_y^2+C_1)(\sigma_x^2+\sigma_y^2+C_2)} \quad (20)$$

式中:μ_x、μ_y 都表示平均强度,σ_x、σ_y 和 σ_{xy} 为标准差,C_1 和 C_2 为常数。

将三种 Sobel 边缘检测算子检测结果代入,可以得到结构相似性系数,如图 10 所示。

从上述评估结果可以看出,对于边缘检测精度,基于多尺度 Sobel 算子的算法比常规的 Sobel 算子精确度提高了 3%,而使用了 Bradley 和 Roth 方法的自适应阈值的多尺度 Sobel 算子比常规的 Sobel 算子精确度提高了 22.7%,对于结构相似性参数,多尺度 Sobel 算子和自适应阈值的多尺度 Sobel 算子相对于常规的 Sobel 算子同样略有提升,保持了非常好的边缘特性,取得了非常好的效果。

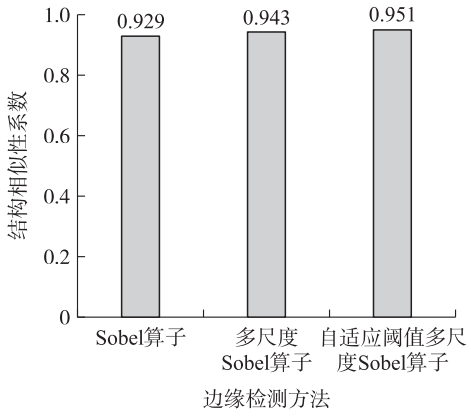


图 10 三种 Sobel 方法结构相似性系数对比图

4 结论

本文利用旋挖钻机大圆盘焊缝的 X 射线检测图像,对 Sobel 算子的边缘检测能力展开了优化,利用多尺度 Sobel 算子和自适应阈值的多尺度 Sobel 算子对 X 射线检测图像进行边缘检测,取得了非常好的效果:

①本文利用有限元分析,确认了大圆盘焊缝为钻桅最危险位置,据此制备了试验样件并进行了 X 射线检测试验。

②本文利用高斯滤波和线性增强,对 X 射线检测图像进行了预处理。

③利用 Otsu's 方法对图像进行了全局阈值选取,为了改善边缘检测效果,依次通过多尺度 Sobel 算子和使用了 Bradley 和 Roth 方法的自适应阈值多尺度 Sobel 算子对 X 射线图像进行边缘检测。利用边缘定位精度和结构相似性参数对改进后 Sobel 算子的改进效果进行评估,认为基于多尺度 Sobel 算子的算法比常规的 Sobel 算子精确度提高了 3%,而基于自适应阈值的多尺度 Sobel 算子比常规的 Sobel 算子精确度提高了 22.7%,且二者在边缘保持方面相比传统的 Sobel 算子同样略有提升,取得了非常好的效果。

参考文献:

[1] Song W, Xia X L, Yang F, et al. Welding Distortion Investigation of Rotary Drill Rig Pipe with Radial Loading Transition Bars[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2022, 199: 104704.

[2] 石信忠,范强生,何文思,等. 桅杆可伸缩式低净空旋挖钻机的设计及应用[J]. 工程机械, 2024, 55(1): 1-6.

[3] Alizadeh O H, Bezin Y, Grossoni I, et al. Finite Element Analysis of a Crossing Panel under Dynamic Moving Load-Effect of Support Conditions and Implications on Foot Fatigue[J]. Proceedings of the Institution of Me-

chanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit,2023,237(5):563-575.

[4] Pesonen T,Riski J,Lipianen K,et al. Framework for a Finite Element Method-Based Simulation Approach to Fatigue Assessment of Welded Joints Using the 4R Method[J]. International Journal of Fatigue,2024,181:108148.

[5] Shen X K,Liu J H,Jiang L,et al. A Novel Weld Defect Detection Method for Intelligent Magnetic Flux Leakage Detection System via Contextual Relation Network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(6):6304-6314.

[6] Lee S C,Hyun H J,Baek J M,et al. X-Ray Beam Test of Fabricated Photo -Diodes for Pohang-Accelerator-Laboratory X-ray Free-Electron Laser[J]. Frontiers in Physics,2024,11:1328639.

[7] 徐文超,张思祥,白芳,等. 基于改进 VGG 网络的单体热电池 X 光图像无损检测方法研究[J]. 光电子·激光,2024,35(2):180-190.

[8] Zhang B X,Zhu G P,Zhu Z B,et al. Impulse Noise Image Restoration Using Nonconvex Variational Model and Difference of Convex Functions Algorithm[J]. IEEE Transactions on Cybernetics,2024,54(4):2257-2270.

[9] He C,Wei Y H,Guo K,et al. Removal of Mixed Noise in Hyperspectral Images Based on Subspace Representation and Nonlocal Low-Rank Tensor Decomposition[J]. Sensors,2024,24(2):327.

[10] Kumar G,Naik A K,Swaminathan R,et al. Gaussian Filtering with Cyber-Attacked Data[J]. IEEE Signal Processing Letters,2024,31:546-550.

[11] Wang Y J,Wang Y,Wan L X,et al. Linearity Enhancement Techniques for PGA Design[J]. Micromachines,2023,14(2):356.

[12] Cortruto M,Singh S,Arora A,et al. Polarization Imaging and Edge Detection with Image-Processing Metasurfaces[J]. Optica,2023,10(10):1331-1338.

[13] Mishra V K, Kumar R, Nareti U, et al. Pansharpening Using IHS Method on Multi-Sensor Data and Multiple Feature Extraction Using Modified Otsu Thresholding[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing,2024,52(1):113-126.

[14] 尹雪松. 基于 Sobel 算子的飞机舱门边缘检测[J]. 自动化应用,2023,64(24):210-212,215.

[15] Wang F,Chen H X. A Visual Effect Enhancement Method of Print Advertisement Based on Sobel Operator Filtering[J]. International Journal of Information and Communication Technology,2023,22(4):391-403.

[16] Chang Q, Li X, Li Y, et al. Multi-Directional Sobel Operator Kernel on GPUs[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing,2023,177:160-170.

[17] Cai N,Xiao P,Ye Q,et al. Improving the Measurement Accuracy of an Absolute Imaging Position Encoder via a New Edge Detection Method[J]. IET Science Measurement & Technology,2017,11(4):406-413.

[18] Panigrahy A K,Maniyath S R,Sathiyanarayanan M,et al. A Faster and Robust Artificial Neural Network Based Image Encryption Technique With Improved SSIM[J]. IEEE Access,2024,12:10818-10833.

钱文君(1999—),男,安徽铜陵人,吉林大学硕士,河海大学博士在读,研究方向为机械设计,机器视觉,119843689@qq.com。