党浩伟, 穆向阳, 王宣, 等. 基于 FPGA 的高效环焊缝缺陷检测方法[J]. 智能计算机与应用,2026,16(1):117-123. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.25091503

基于 FPGA 的高效环焊缝缺陷检测方法

党浩伟, 穆向阳, 王 宣, 魏思梦
(西安石油大学 电子工程学院, 西安 710065)

摘 要: 针对石油管道 X 射线环焊缝图像在复杂环境中实时性和准确率较低的问题,提出了一种基于 FPGA 的高效焊缝图像处理算法。该方法通过改进 Canny 算法并结合 FPGA 的并行处理特性,实现了快速准确的环焊缝图像边缘检测。通过引入自适应中值-高斯滤波器提升抗噪性能,采用 Cordic 算法优化 Sobel 算子的梯度幅值计算,并使用自适应阈值法解决了传统算法中阈值手动设置的局限性。研究实验结果表明,在 100 MHz 时钟频率下处理 640×480 分辨率的 X 射线焊缝缺陷图像仅需 3.06 ms。与经过中值滤波改进的 Canny 算法相比,该算法在环焊缝缺陷边缘的连续性、细节保留和抗干扰能力方面显著提升,边缘点数、四连通域数、八连通域数分别提高了 13.63%、37.43%和 23.85%,满足复杂环境下高实时性管道焊缝缺陷图像处理的需求。

关键词: FPGA; Canny 算法; 自适应中值-高斯滤波; Sobel 算子; Cordic 算法
中图分类号: TP391 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-2163(2026)01-0117-07

An efficient circumferential weld defect detection method based on FPGA

DANG Haowei, MU Xiangyang, WANG Xuan, WEI Simeng
(College of Electronic Engineering, Xi′an Shiyou University, Xi′an 710065, China)

Abstract: To address the low real-time performance and accuracy of X-ray circumferential weld images in complex environments, an efficient FPGA-based weld image processing algorithm is proposed. By improving the Canny algorithm and leveraging FPGA parallelism, the method achieves fast and accurate edge detection. An adaptive median-Gaussian filter enhances noise resistance, the Cordic algorithm optimizes Sobel gradient magnitude calculation, and adaptive thresholding eliminates the limitations of manual parameter tuning. Experiments show that processing 640×480 X-ray weld images at 100 MHz takes only 3.06 ms. Compared with median-filter-improved Canny, this approach significantly improves edge continuity, detail preservation, and anti-interference capability, increasing edge points, four-connected domains, and eight-connected domains by 13.63%, 37.43% and 23.85% respectively, meeting real-time weld defect detection requirements in complex environments.

Key words: FPGA; Canny algorithm; adaptive median-Gaussian filter; Sobel operator; Cordic algorithm

0 引 言

近年来,石油天然气管道运输因其经济优势,已成为能源输送的关键环节。管道由于其焊接技术以及环境影响容易出现夹渣、裂纹、气孔、弧坑等焊缝缺陷[1],这些焊缝缺陷对整个管道可靠性及使用寿命构成潜在威胁,然而,传统焊缝检测方法依赖人工检查,效率低、误检漏检率高,难以满足实际需求[2]。因此,针对管道焊缝缺陷的边缘检测研究逐渐成为保障石油天然气管道安全运输的研究热点。Canny 算法因具有良好的抗噪能力以及准确性等优点,成为当前研究的重点方向,但由于焊缝检测对实时性要求极高,通用计算设备无法满足高速处理需求[3]。相比之下,FPGA(Field Programmable Gate Array)具备并行处理能力,显著提升了运算效率。因此,本文研究了一种基于 FPGA 加速的改进 Canny 算法,用于石油管道焊缝缺陷检测[2]。

针对基于 FPGA 的边缘检测方法,王子硕等学

基金项目: 陕西省重点研发计划(2022GY-135)。
作者简介: 党浩伟(2001—),男,硕士研究生,主要研究方向:图像处理与识别; 王 宣(2001—),男,硕士研究生,主要研究方向:FPGA 技术与智能检测; 魏思梦(2001—),女,硕士研究生,主要研究方向:FPGA 图像处理。
通信作者: 穆向阳(1969—),男,教授,主要研究方向:现代检测技术与智能机器。Email:D1538475598@163.com。
收稿日期: 2025-09-15

者[4]提出了通过双边滤波和梯度直方图的方法来解决传统算法的阈值选取问题,但双边滤波在FPGA 上资源占用过大,影响了效率。韦海萍等学者[5]采用双阈值法进行边缘检测,虽然提高了检测精度,但由于未进行滤波处理,对于噪声较多的图像,难以实现准确的边缘检测。穆向阳等学者[6]将中值滤波和 Sobel 边缘检测应用于 FPGA 实现焊缝检测,但未改进的 Sobel 会产生噪声误判,且缺乏自适应性,在复杂场景和非均匀光照下鲁棒性和准确性均未实现有效提升。隋旭阳等学者[7]为解决 Canny 算法计算量大和耗时长的问题,通过使用模板来替代卷积运算,并以流水线形式对系统结构进行改进和优化。然而,该方法在图像平滑滤波方面仍存在不足,导致在处理噪声较多的复杂图像时表现不佳。

因此,本文针对复杂情况下,石油管道焊缝缺陷检测中的实时性以及检测准确性问题开展研究,采用 FPGA 平台加速处理改进的 Canny 算法,以提升焊缝缺陷检测效果。

1 改进 Canny 边缘检测算子

Canny 算法是一种经典的边缘检测方法,步骤包括高斯平滑去噪、计算梯度与非极大值抑制,最后通过双阈值检测和边缘跟踪获取完整边缘图像[8]。高斯滤波虽然在去除椒盐噪声方面有不错的效果,但可能损失图像细节和边缘,并且传统 Canny 算法通过手动设定的双阈值进行边缘检测,但阈值过高或过低都会导致边缘信号丢失或噪声误判,缺乏自适应性,在复杂场景和非均匀光照下鲁棒性和准确性受限[9]。

为此,本文在已有 Canny 算法的基础上进行了以下改进:

(1)将高斯滤波替换为自适应中值-高斯滤波,既能有效去除噪声,又能保留图像细节,对含有强噪声和明显边缘特征的图像表现良好。

(2)采用 Cordic 算法改进 Sobel 算子计算梯度幅值和方向,并引入 45°和 135°的算子,提升了算法的精确度和计算效率。

(3)使用自适应阈值分割,替代手动设置阈值,解决了手动阈值设置缺乏自适应能力的问题。

1.1 自适应中值-高斯滤波器

为优化边缘检测,本文结合自适应中值滤波与高斯滤波,提升抗噪性能。自适应中值滤波先去除椒盐噪声,保留边缘信息;随后高斯滤波进一步平滑图像,减少高斯噪声,优化了 Canny 算子的边缘检测效果[10]。

自适应中值-高斯滤波去噪的主要过程是:

(1)灰度图像进行二值化后,通常会出现边缘轮廓杂乱和较大的"空洞"杂质。

(2)为解决这些杂质问题,使用尺度变换将"空洞"视为噪声去除,并通过高斯采样,确保图像轮廓信息的保留,缩小后的图像长边和短边像素均不低于 120 个,各边缩小的倍数的公式具体如下:

$$P_1(x) = \text{round}\left[\log_2 \frac{c_1}{120}\right] \tag{1}$$

$$P_2(x) = \text{round}\left[\log_2 \frac{c_2}{120}\right] \tag{2}$$

其中,P_1 表示长边的缩小倍数;P_2 表示短边的缩小倍数;round$[x]$ 表示下采样函数;c_1 表示原始图像长边的像素个数;c_2 表示原始图像短边的像素个数。

(3)对下采样后的图像和丢失的图像信息进行自适应中值滤波去噪。滤波流程如图 1 所示。由图 1 可知,滤波过程分为 2 步:

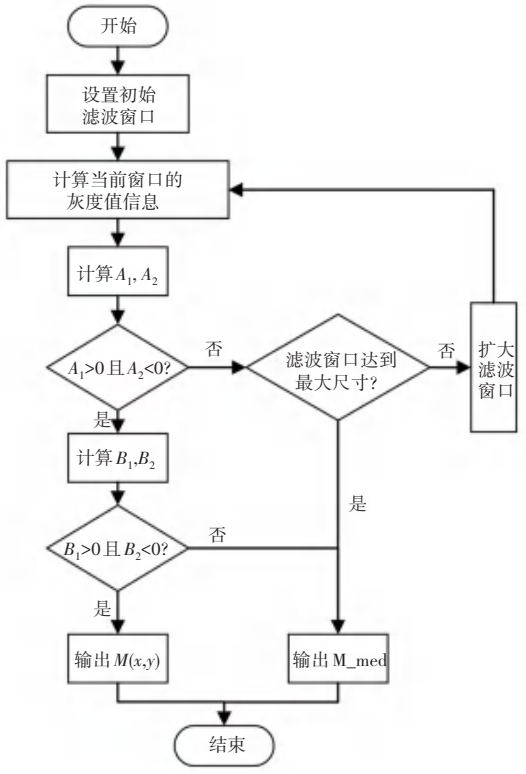


图 1 自适应中值滤波算法流程图

Fig. 1 Flowchart of adaptive median filtering algorithm

步骤 1 计算灰度中值与最小值的差值和灰度中值与最大值的差值。用到的公式为:

$$A_1 = M_{\text{med}} - M_{\text{min}} \tag{3}$$

$$A_2 = M_{\text{med}} - M_{\text{max}} \tag{4}$$

其中，M_{max} 表示过滤器窗口中的最大灰度值；M_{med} 表示过滤器窗口中灰度值的中值；M_{min} 表示过滤器窗口中最小的灰度值；$M_{(x,y)}$ 表示图像 (x,y) 处的灰度值。

若 $A_1>0$ 且 $A_2<0$，则进入步骤 2，否则继续扩大滤波窗口并重新计算，最终输出中值 M_{med} 作为像素值。

步骤 2　计算当前像素灰度与窗口最小值的差值和当前像素灰度与窗口最大值的差值。用到的公式为：

$$B_1 = M_{(x,y)} - M_{min}$$

$$B_2 = M_{(x,y)} - M_{max}$$

若 $B_1>0$ 且 $B_2<0$，则输出当前像素灰度值 $M_{(x,y)}$；否则，输出中值 M_{med}。

(4)通过引入高斯滤波，进一步平滑图像，减少图像中的高斯噪声。假设图像 $P(i,j)$ 中某点的像素坐标为 (i,j)，高斯滤波的权重系数 $w(i,j,k,l)$ 和输出像素 $g(i,j)$ 的计算公式为：

$$w(i,j,k,l) = \exp\left(-\frac{(i-k)^2+(j-l)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

$$(i,j) = \frac{\sum_{k,l} P(k,l)w(i,j,k,l)}{\sum_{k,l} w(i,j,k,l)} \quad (6)$$

其中，(k,l) 表示选定中心 (i,j) 邻域内的任意一点，σ 表示高斯滤波器的标准差，用于控制滤波器的宽度。

(5)将滤波后的图像进行拉普拉斯采样，恢复到原始尺寸，同时补充丢失的图像信息，从而有效去除杂质噪声。

(6)为评价滤波效果，本文对该滤波算法进行了实验，实验结果如图 2 所示。

(a) 添加复合噪声图像

(b) 中值滤波处理效果图

(c) 均值滤波处理效果图

(d) 高斯滤波处理效果图

(e) 自适应中值-高斯滤波处理效果图

图 2　滤波算法对比图

Fig. 2　Comparison chart of filtering algorithms

石油管道焊缝缺陷图像中常见的噪声包括椒盐噪声和高斯噪声,前者多因传感器故障或数据传输错误引发,后者则源于成像设备的热噪声和电路噪声。通过对比几种经典滤波算法与自适应中值-高斯滤波在处理复合噪声后的滤波效果,发现自适应中值-高斯滤波明显优于其他方法。为此,本文引入 PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)对图像信息进行统计分析,结果见表 1。

表 1 滤波峰值信噪比信息统计

Table 1 Filtered PSNR information statistics

原始图像	中值滤波	均值滤波	高斯滤波	自适应中值-高斯滤波
1	10.62	11.05	11.01	13.38
2	10.92	11.28	11.22	13.17
3	10.66	11.08	11.03	13.30

从表 1 的数据分析可知,相较于其他滤波方法,自适应中值-高斯滤波显著提升了信噪比,其中自适应中值-高斯滤波相较于中值滤波平均提高了 19.26%,相较于均值滤波平均提升了 19.83%,相较于高斯滤波平均提升了 2.10%。这表明,本文改进的自适应中值-高斯滤波在去噪效果上明显优于其他滤波方法,显著提高了图像质量。

1.2 改进 Sobel 算子计算梯度幅值和方向

设目标图像函数为 $f(x,y)$,Sobel 算子对应的 2 个矩阵如下:

$$\boldsymbol{Gx}=\begin{bmatrix}-1 & 0 & +1\\ -2 & 0 & +2\\ -1 & 0 & +1\end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{Gy}=\begin{bmatrix}+1 & +2 & +1\\ 0 & 0 & 0\\ -1 & -2 & -1\end{bmatrix} \tag{8}$$

梯度方向和幅值可表示为:

$$\boldsymbol{G}=\sqrt{\boldsymbol{Gx}^2+\boldsymbol{Gy}^2+\boldsymbol{G}_{45}^2+\boldsymbol{G}_{135}^2} \tag{9}$$

通过将这 2 个卷积核与像素阵列 $\boldsymbol{A}$ 卷积,可计算中心像素在 x 和 y 方向上的梯度幅值和方向[11]。为提高梯度幅度评估的精确度,引入了 45° 和 135° 算子,定义公式如下所示:

$$\boldsymbol{G}_{45}=\begin{bmatrix}-2 & -1 & 0\\ -1 & 0 & +1\\ 0 & +1 & +2\end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{G}_{135}=\begin{bmatrix}0 & -1 & -2\\ +1 & 0 & -1\\ +2 & +1 & 0\end{bmatrix} \tag{11}$$

这一改进提高了算法的精确度和计算效率,能捕捉更细致的梯度信息[12]。采用 3×3 矩阵结构、共 9 个元素,共同作用于图像以揭示边缘特征。由此推得的公式为:

$$\begin{cases}f(x,y)=\mathrm{mag}(f)=\sqrt{\boldsymbol{Gx}^2+\boldsymbol{Gy}^2}\\ \delta(x,y)=\arctan\left(\dfrac{\boldsymbol{Gy}}{\boldsymbol{Gx}}\right)\end{cases} \tag{12}$$

$$\boldsymbol{G}=|\boldsymbol{Gx}|+|\boldsymbol{Gy}|+|\boldsymbol{G}_{45}|+|\boldsymbol{G}_{135}| \tag{13}$$

其中,$\boldsymbol{Gx}$,$\boldsymbol{Gy}$,$\boldsymbol{G}_{45}$,$\boldsymbol{G}_{135}$ 分别表示在 x 方向、y 方向、45° 和 135° 方向上的卷积核;$f(x,y)$ 表示目标图像函数;$\delta(x,y)$ 表示目标函数梯度方向的方向角;$\mathrm{mag}(f)$ 表示目标函数梯度方向的幅值;G 表示图像的每一个像素梯度。

FPGA 计算 arctan 函数资源消耗大,本方案使用坐标旋转数字算法(Cordic)算法计算梯度强度和方向,以节约资源和提高效率。Cordic 算法通过迭代旋转逐步逼近目标角度[13],利用 2^{-i} 逼近 $\tan\theta$。在多次迭代中,$\cos\theta$ 收敛于固定值。在坐标平面上,向量 $v_1=(x_1,y_1)$ 经过逆时针旋转后变为 $v_2=(x_2,y_2)$,如图 3 所示。

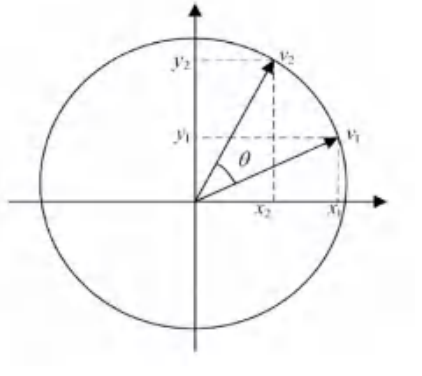


图 3 向量坐标旋转图

Fig. 3 Vector coordinate rotation diagram

向量 v_1 和向量 v_2 之间的坐标变换可以表示为:

$$\begin{cases}x_2=x_1\cos\theta-y_1\sin\theta=\cos\theta(x_1-y_1\tan\theta)\\ y_2=x_1\sin\theta+y_1\cos\theta=\cos\theta(y_1+x_1\tan\theta)\end{cases} \tag{14}$$

$$\begin{cases}x_2=0.607\,253\times(x_1-y_1\times2^{-i})\\ y_2=0.607\,253\times(y_1-x_1\times2^{-i})\end{cases} \tag{15}$$

其中,θ 表示向量 v_1,v_2 之间的夹角。

1.3 自适应阈值分割

X 射线焊缝图像中,缺陷边缘占比小,多数为非边缘点,传统双阈值方法难以实现全面边缘检测[14]。为解决梯度幅值低时的阈值选择问题,本文提出一种改进的双阈值选取方法。

当边缘信息丰富且梯度分散时,采用较小的 k

值以保留更多边缘信息；反之，采用较大的 k 值。首先，计算图像的梯度幅度平均值 E_{ave} 的定义公式为：

$$E_{ave} = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} | E[i,j] | /(m \times n) \quad (16)$$

其中，E_{ave} 表示梯度幅度的平均值；m 和 n 分别表示图像宽度方向和高度方向上的像元数；$E[i,j]$ 表示图像梯度幅度。

此时，将梯度幅度小于 E_{ave} 的 15%～20%的像素标记为非边缘点，避免引入噪声[15]。针对每个像素点，在其 $N \times N$ 矩阵内（中心为该像素）计算阈值，并计算图像标准差。图像标准差的计算公式如下：

$$\sigma = \left(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} | E[i,j] - E_{ave} |^2/(m \times n) \right)^{1/2} \quad (17)$$

其中，σ 表示图像标准差。

接下来计算高低阈值，确保每个像素的阈值自适应，以更准确地检测边缘[16]。高低阈值的计算公式具体如下：

$$T_h = E_{ave} + k \cdot \sigma \quad T_l = T_h/2 \quad (18)$$

$$T_l = T_h/2 \quad (19)$$

其中，T_h 和 T_l 分别表示高阈值和低阈值；k 表示其系数，$k \in (1.2, 1.6)$[17]。

2　硬件加速电路设计

图 4 展示了其对应的硬件模块设计实现。该设计以 3×3 窗口为基础，通过模块化处理，分别计算图像的垂直、水平及 2 个对角方向的梯度，并结合非极大值抑制模块以实现精确的边缘检测[18]。

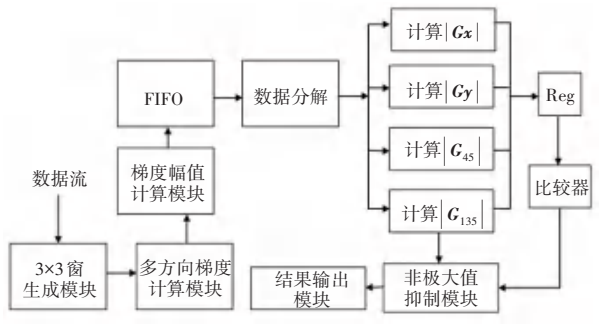


图 4　硬件模块结构图

Fig. 4　Hardware module structure diagram

该结构描述了一个基于多方向梯度计算的实时图像处理系统：输入图像数据首先通过 FIFO 缓冲，随后进入梯度计算模块并行处理水平梯度（$\boldsymbol{Gx}$）、垂直梯度（$\boldsymbol{Gy}$）、45° 方向梯度（$\boldsymbol{G}_{45}$）和 135° 方向梯度（$\boldsymbol{G}_{135}$）；中间处理结果经寄存器 Reg 暂存后，由多方向梯度计算模块进行融合处理，再通过比较器进行阈值决策，最终由结果输出模块生成边缘检测或特征提取结果[19]。整个系统采用并行计算和流水线设计，实现高效的多方向梯度特征提取。

本方案通过流水线方式处理图像数据，以提升效率和速度。设计包含多个模块：首先，RGB888 格式图像数据被转换为 YCbCr444 格式，然后通过中值-高斯滤波器平滑处理以保留边缘信息；接着，利用 Cordic 算法计算梯度强度和方向，非极大值抑制模块确保检测到准确的边缘[20]；最后，通过双阈值分割进行边缘搜索。各模块协同工作，优化了边缘检测效果和处理效率。总体设计流程如图 5 所示。

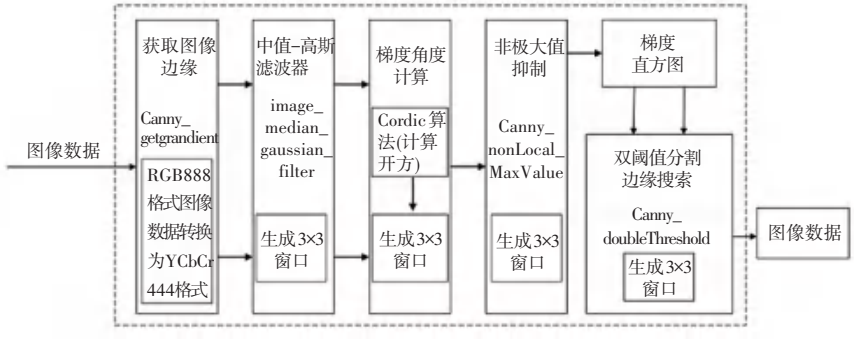


图 5　硬件设计流程图

Fig. 5　Flowchart of hardware design

3　综合与仿真结果

本次实验的硬件环境为 AMD Ryzen 5 6600H with Radeon Graphics 3.30 GHz 16 GB RAM，利用 Vivado 平台进行代码仿真，旨在直观展示本方案算法改进的优势以及 FPGA 平台在处理速度方面的优势。

3.1　Vivado 2018.3 环境实现

为观察逻辑功能，建立了仿真模型。具体的仿真结果如图 6 所示。cmos_clk 和 cmos_rst_n 为输入的时钟和复位信号。post0 系列信号为 RGB888 到 YCbCr444 转换后的图像信号；Gauss 系列为高斯滤

波后的信号；Canny 系列为边缘检测后的信号。canny _ vsync、canny _ hsync 标识图像开始位置，canny_de 表示数据有效性，img_canny 显示边缘检测结果，其中 1 为边缘，0 为非边缘。线标注位置'cmos'信号高电平标识图像帧开始；post0 信号高电平表示 RGB888 到 YCbCr444 转换后的图像同步；img_canny 为 1 表示边缘检测结果，且仿真时间约为 3.06 ms。

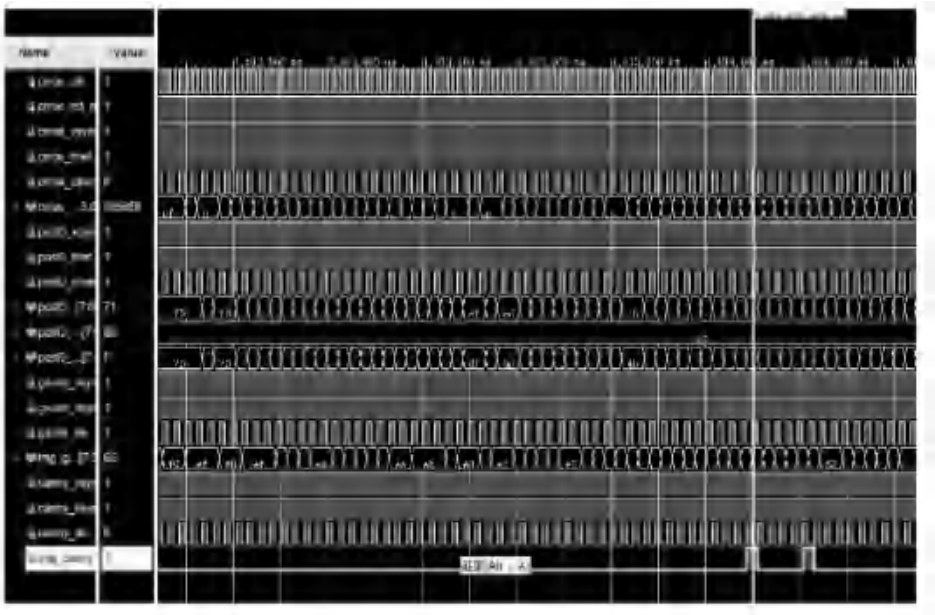


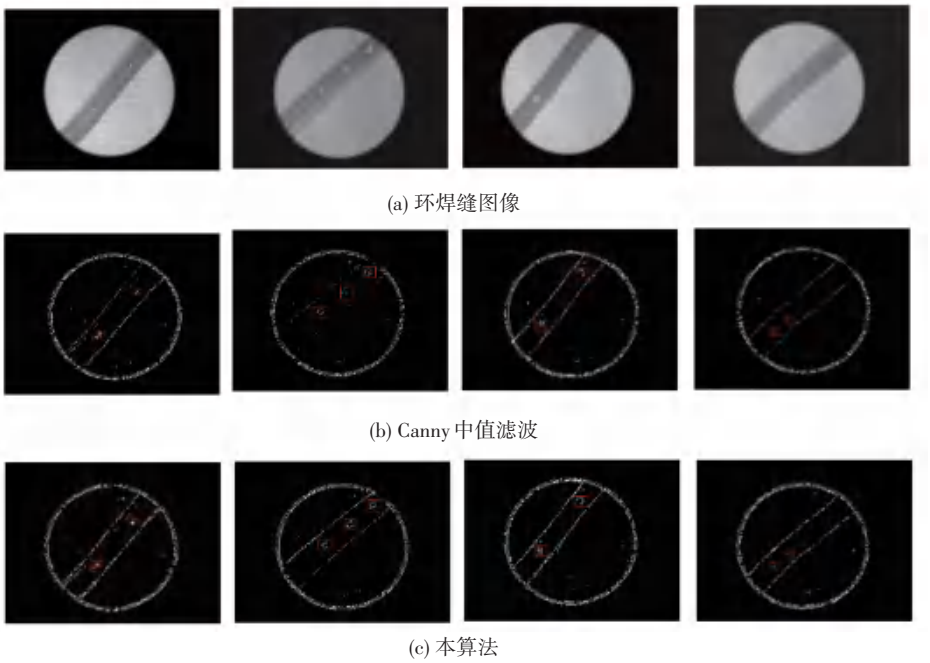
图 6 算法仿真波形图

Fig. 6 Diagram of algorithm simulation waveform

3.2 Canny 算法实验结果

为了评价改进的 Canny 算法在石油管道焊缝缺陷边缘检测中的平滑效果和有效性，在 Vivado 环境下对比了传统 Canny 算子和本文算法，并对检测到的缺陷边缘进行了标注(见图 7)。

通过统计边缘点数、四连通域数、八连通域数来评估检测效果(见表 2)。由表 2 可知，改进后的 Canny 算法在这 3 项指标上均高于传统算法，分别平均提升了 13.63%、37.43%和 23.85%，表明改进的 Canny 算子在边缘连续性上具有更优越表现，使得环焊缝缺陷的边缘细节得到更好的保留连接，为后续缺陷识别打下了坚实基础。



(a) 环焊缝图像

(b) Canny 中值滤波

(c) 本算法

图 7 FPGA 边缘检测结果对比图

Fig. 7 Comparison results of FPGA edge detection results

表 2　改进 Canny 算法性能比较

Table 2　Comparison of improved Canny algorithms

图片	Canny 算法	边缘点数	四连通域数	八连通域数
1	Canny+中值算法	63 168	7 047	666
	本算法	72 744	9 282	903
2	Canny+中值算法	50 628	4 953	702
	本算法	62 412	7 317	861
3	Canny+中值算法	64 224	7 260	573
	本算法	72 828	9 417	786
4	Canny+中值算法	63 780	5 694	783
	本算法	65 484	8 004	783

4　结束语

本文通过改进 Canny 边缘检测算法，并利用 FPGA 平台的并行处理和流水线特性对算法进行了加速处理，显著提升了处理速度。在默认系统时钟频率为 100 MHz、分辨率为 640×480 的 X 射线焊缝图像实验中，改进后的 Canny 算法在边缘点数、四连通域数和八连通域数上分别平均提高了 13.63%、37.43%和 23.85%，表现出更优的边缘连续性和细节保留能力，能够更准确地识别环焊缝缺陷边缘，为后续的缺陷识别奠定了坚实基础。

此外，改进的算法在噪声抑制方面表现更佳，自适应中值-高斯滤波器有效地减少了噪声对边缘检测的干扰，提升了准确性，并通过 FPGA 的加速处理，仿真时间缩短至 3.06 ms，增强了边缘检测算法的实时性和硬件移植性，然而在某些过于细小的缺陷边缘检测上仍需进一步优化和改进。综上，本方案不仅大幅提升了边缘检测速度，还显著改善了检测效果，满足了复杂条件下 X 射线焊缝缺陷图像检测的实时性和准确性要求。

参考文献

[1] 穆春阳，李闯，马行，等. 改进 YOLOv7-tiny 的轻量化大型铸件焊缝缺陷检测[J]. 组合机床与自动化加工技术，2024(7)：156-160.

[2] 王岩，胡睿甫，陈代鑫，等. 基于自适应阈值分割改进 Canny 算子的管道边缘检测方法研究[J]. 光电子·激光，2024，35(2)：164-170.

[3] 王慧萌，葛泉波，吴庆涛，等. 基于改进 Canny 算子的雾中无人机边缘检测方法[J]. 控制工程，2025，32(6)：1030-1038.

[4] 王子硕，单彦虎，储成群，等. 改进边缘检测算法及其 FPGA 实现[J]. 激光杂志，2024，45(3)：74-80.

[5] 韦海萍，赵保军，唐林波，等. Canny 算法的改进及其硬件的实现[J]. 光学技术，2006(2)：263-266.

[6] 穆向阳，徐益. 一种快速焊缝图像处理的 FPGA 实现方法[J]. 制造技术与机床，2023(7)：163-168.

[7] 隋旭阳，陈卓，刘议聪，等. 基于 FPGA 的实时视频边缘检测系统[J]. 兵工自动化，2021，40(2)：58-60.

[8] 罗小青，胡荣. 一种采用改进 Canny 算子的机械臂识别与定位算法设计[J]. 现代电子技术，2024，47(13)：27-31.

[9] 何滇. 低时延 CORDIC 算法设计与 ASIC 实现[J]. 中国集成电路，2024，33(4)：59-64.

[10] XU Li, ZHENG Dechun. A novel Sobel edge detection accelerator based on reconfigurable architecture[J]. Traitement du Signal, 2022, 39(4): 1421.

[11] DHAR K K, MITRA A, BHATTACHARYA P. Edge detection of image using image divergence and down sampling method[J]. International Journal of Engineering and Manufacturing, 2022, 3: 14-24.

[12] RONG Weibin, LI Zhanjing, ZHANG Wei, et al. An improved Canny edge detection algorithm[C]//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 577-582.

[13] LIU Wenjie, WANG Lu. Quantum image edge detection based on eight-direction Sobel operator for NEQR[J]. Quantum Information Processing, 2022, 21: 190.

[14] HUANG Chenzhi, ZHANG Xingde, LIU Shuang, et al. Construction of pore structure and lithology of digital rock physics based on laboratory experiments[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2021, 11(5): 2113-2125.

[15] WANG Zhenzhou, LI Kangyang, WANG Xiang, et al. An image edge detection algorithm based on multi-feature fusion[J]. Computers, Materials and Continua, 2022, 73(3): 4995-5009.

[16] MORA J P, BEDLE H, MARFURT K J. Fault enhancement using probabilistic neural networks and Laplacian of a Gaussian filter: A case study in the Great South Basin, New Zealand[J]. Interpretation, 2022(2): 10-15.

[17] JANG H, KIM T Y, LEE Y C, et al. A review: technological trends and development direction of pipeline robot systems[J]. Journal of Intelligent & Robotic System, 2022, 105: 59.

[18] 曾菲. 基于高低阈值 Canny 算子的遥感影像特征边缘检测[J]. 电子设计工程，2025，33(10)：167-170.

[19] 李萍，杨丹. 基于改进 Canny 算子的含噪图像边缘检测[J]. 邵阳学院学报(自然科学版)，2024，21(6)：20-27.

[20] 包启龙，景会成，张靖轩，等. 一种改进 Canny 算子的图像边缘检测方法[J]. 现代电子技术，2024，47(23)：36-42.