

基于改进 Canny 算法的 3D 金属打印件表面缺陷检测^{*}许仕林^{1,2} 王文成^{1,2} 陆孝杰^{1,2} 余智科^{1,2} 郑诗翰^{1,2}

(1. 广西高校先进制造与自动化技术重点实验室 桂林 541006; 2. 桂林理工大学机械与控制工程学院 桂林 541006)

摘 要: 针对 3D 金属打印件表面因技术和材料而出现缺陷的问题,提出了一种基于改进 Canny 算法的 3D 金属打印件表面缺陷检测方法,通过采用改进算法对 3D 金属打印件缺陷图像进行处理。首先,采用一种改进的双边滤波器替代高斯滤波,处理椒盐噪声下的金属打印件表面缺陷图像;然后采用动态加权的四方向 Scharr 算子计算梯度幅值及确定梯度方向来更好地突出 3D 金属打印件的边缘信息;再采用改进的非极大值抑制算法进一步处理图像;最后采用动态阈值与滞后边缘追踪算法实现高低阈值的选择和提高边缘的连续性。通过比对不同算法对 3D 金属打印件表面的缺陷检测,实验结果显示,改进的 Canny 算法对比传统算法在平滑噪声和边缘连续性方面表现更好,其中峰值信噪比(PSNR)值相较于传统高斯滤波器提升 46.70%,结构相似性(SSIM)值提升 39.93%,处理后的图像效果相比于传统 Canny 算法的普拉特品质因数(PFOM)值提升 36.46%。能够有效检测 3D 金属打印件表面的缺陷,具有较强的实用性。

关键词: Canny 算法;3D 金属打印;机器视觉;缺陷检测;归一化互相关匹配

中图分类号: TB487;TP391.41;TN911.73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.20

Surface defect detection of 3D metal prints based on improved Canny algorithm

Xu Shilin^{1,2} Wang Wencheng^{1,2} Lu Xiaojie^{1,2} Yu Zhike^{1,2} Zheng Shihan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Automation Technology in Guangxi Universities, Guilin 541006, China;

2. College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: Aiming at the problem of defects occurring on the surface of 3D metal printed parts due to technology and materials, a surface defect detection method for 3D metal printed parts based on an improved Canny algorithm is proposed, which processes the defect images of 3D metal printed parts by using the improved algorithm. First, an improved bilateral filter is used to replace Gaussian filtering to handle the surface defect images of metal printed parts under salt- and-pepper noise. Then, a dynamically weighted four-direction Scharr operator is adopted to calculate the gradient amplitude and determine the gradient direction, so as to better highlight the edge information of 3D metal printed parts. Next, an improved non-maximum suppression algorithm is employed to further process the image. Finally, the dynamic threshold and hysteresis edge tracking algorithm are utilized to realize the selection of high and low thresholds and enhance the continuity of edges. By comparing the defect detection results of different algorithms on the surface of 3D metal printed parts, the experimental results show that the improved Canny algorithm performs better in noise smoothing and edge continuity than the traditional algorithm. Specifically, the peak signal-to-noise ratio (PSNR) value is increased by 46.70% compared with the traditional Gaussian filter, the structural similarity index (SSIM) value is improved by 39.93%, and the probability of figure of merit (PFOM) value of the processed image is enhanced by 36.46% compared with that of the traditional Canny algorithm. This method can effectively detect the defects on the surface of 3D metal printed parts and has strong practicability.

Keywords: Canny algorithm; 3D metal printing; machine vision; defect detection; normalized cross-correlation matching

0 引 言

随着 3D 打印技术的飞速发展,3D 金属打印工艺逐渐

成熟,在我国制造业、医疗、航空航天等领域应用广泛,为传统制造业带来变革^[1]。但制备工艺不完善导致金属 3D 打印件易出现内部缺陷,且缺陷因工艺、结构差异呈现多样

性、随机性,易引发结构失效与安全隐患^[2]。因此,其表面缺陷检测成为行业核心需求。

近年来,学术界围绕边缘检测算法的优化开展了诸多探索,但现有成果在 3D 金属打印件缺陷检测场景中的适配性仍有明显不足。许万卫^[3]采用超声检测可识别空隙、未熔合等缺陷。但 3D 金属打印件表面粗糙度高(对应实际场景中的椒盐噪声)会干扰超声信号,导致检测盲区;张晓阳等^[4]采用自适应中值-高斯滤波,虽能兼顾去噪与边缘保留,但面对 3D 金属打印件典型的椒盐噪声时,噪声抑制不彻底,且高斯滤波易轻微模糊边缘细节。赵朝朝等^[5]针对手工捏花尺寸测量,提出结合均值漂移图像分割与 Scharr 算子的改进 Canny 算法,通过 PCA 获取轮廓主方向实现尺寸计算,但其研究对象为质地柔软的手工制品,未考虑 3D 金属打印件因表面粗糙度产生的高强度椒盐噪声与高反光导致的弱边缘复合问题,尺寸测量方法也难以适配金属打印件的复杂缺陷轮廓;宋倩男等^[6]基于 FPGA 平台设计 8 方向 Sobel 边缘检测系统,通过自适应阈值与 NMS 提升实时性,但其核心依赖 Sobel 算子,边缘检测精度相较于 Canny 算法存在天然局限,且系统设计侧重通用视频流处理,未针对金属打印件表面缺陷的细微特征优化;于新善等^[7]提出 Canny-Cauchy 算法,以柯西分布一阶导数构建检测函数并结合自适应中值滤波,虽增强了噪声抑制与边缘响应能力,但柯西函数的二维扩展未考虑金属打印件弱边缘(如微小划痕)的梯度变化特性,且未解决该场景下边缘定位精度与运算效率的平衡问题,难以直接应用于 3D 金属打印件的表面缺陷检测。

针对上述研究空白,本文对 Canny 算法进行多模块协同改进,核心在于适配 3D 金属打印件“椒盐噪声+高反光弱边缘”的场景特性:首先,采用改进的自适应双边滤波,通过动态调整滤波窗口大小($3 \times 3 \sim 7 \times 7$),针对性滤除金属打印件表面的椒盐噪声,同时避免传统滤波导致的边缘模糊;其次,在文献[8]基础上设计动态加权的四方向 Scharr 算子(水平、垂直、 45° 、 135°),通过各方向梯度幅值占比动态加权,弥补传统算子斜向边缘丢失的缺陷,强化金属弱边缘提取能力;再者,提出适配新算子的改进非极大值抑制算法,无需插值即可直接比较四方向真实梯度幅值,解决传统 NMS 定位误差大的问题,提升缺陷边缘定位精度;最后,采用动态阈值与滞后边缘追踪算法,基于非零梯度百分位自动计算阈值,结合 8 邻域连通性修复断裂边缘,避免人工阈值的不稳定性,保证边缘连续性。

本文方法通过多模块协同优化,在去噪效果、边缘连续性与定位精度上形成突破,可有效检测 3D 金属打印件表面缺陷,满足工业实时检测需求,具有实际应用价值。

1 传统 Canny 边缘检测算法

在 Canny 算法的设计过程中,首先在连续域下通过数学推导对边缘检测函数进行量化分析,然后将符合设计准

则的函数进行采样,映射到离散域下得到 Canny 算子^[5]。以下是该算法的基本检测步骤。

1) 高斯滤波(平滑图像)

边缘检测过程中常因为噪声原因而导致检测出现误判。因此,先采用高斯滤波对图像进行平滑处理,以此降低噪声干扰。高斯滤波的二维核函数定义为:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中: σ 表示高斯函数的标准差,控制空间平滑程度。

2) 梯度计算(边缘增强)

在平滑图像后,算法利用 Sobel 算子对图像的梯度幅值和方向进行卷积计算。Sobel 水平 (G_x) 和垂直 (G_y) 梯度算子分别定义为:

$$\begin{cases} G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * I \\ G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} * I \end{cases} \quad (2)$$

式中: I 表示输入图像,即经高斯滤波处理后的图像矩阵; $*$ 表示卷积。

梯度幅值 G 和方向 θ 可以由式(3)计算:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (3)$$

3) 双阈值检测与边缘连接

人工设定高、低 2 个阈值对经过非极大值抑制处理后的图像进行双阈值提取处理,采用连接方法消除虚假边缘并连接断续边缘^[7]。

2 改进 Canny 边缘检测算法

2.1 改进的双边滤波

传统的 Canny 算法是利用高斯滤波器来实现图像的平滑滤波,这种无差别滤波方式会造成边缘信息模糊甚至丢失。为了减小在图像边缘检测中的椒盐噪声干扰,本文在滤波图像的过程中提出一种改进的自适应双边滤波器。

双边滤波算法是一种高效的非线性滤波技术,该算法在去噪的同时,可有效保留图像的边缘信息。其工作原理基于两个关键因素:一是中心像素点与邻近像素点之间的空间距离;二是像素之间的亮度差异。通过调整两个双边作用的权重阈值,该算法能够实现既平滑又保留边缘的滤波效果,可有效确保处理后图像的视觉真实性^[9]。其基本公式为:

$$BF[I]_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in \Omega} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) I_q \quad (4)$$

$$W_p = \sum_{q \in \Omega} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(I_p - I_q) \quad (5)$$

$$G_{\sigma_s}(d) = \exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (6)$$

$$G_{\sigma_r}(\Delta I) = \exp\left(-\frac{\Delta I^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (7)$$

式中: p, q 分别为区域中心的像素点和输入的像素点; I_p, I_q 为 p, q 两点的灰度值; $BF[I]_p$ 表示滤波后中心像素 p 的输出值; W_p 表示加权系数; Ω 表示以 p 为中心的邻域像素集合; G_{σ_s} 表示空间高斯函数; G_{σ_r} 表示值域高斯函数; σ_s 表示空间高斯函数的标准差; σ_r 表示值域高斯函数的标准差; d 表示输入距离 $\|p - q\|$; ΔI 表示灰度值差异 $\|I_p - I_q\|$ 。

双边滤波通过联合空间和值域高斯核实现边缘平滑,但基于灰度相似性的权重机制存在固有局限,当中心像素受椒盐噪声污染时,由于与邻域像素灰度差异显著,值域权重趋近于零,导致噪声点难以被有效修正,刘宇涵等^[10]提出一种自适应模糊中值滤波,该算法在密度较高的椒盐噪声下能准确地检测出真实边缘。本文根据金属打印件检测的实际情况并在借鉴其自适应模板的基础上进一步改进。改进的自适应双边滤波是通过调整滤波窗口的大小来因对不同噪声等级的图像。具体的步骤包括:

1) 首先对图像模板区域的中心进行检测,检测是否存在椒盐噪声,由于椒盐噪声通常为该区域的极值。因此,本文设置一个阈值来区分像素点是否为椒盐噪声,即当该区域像素值 $Q_{(i,j)}$ 小于噪声阈值 T 或大于 $255 - T$,则认为该像素为噪声点,并执行步骤 2)。若不是则保持当前像素值不变,执行步骤 3)。具体判断公式为:

$$Q_{(i,j)} < T \text{ 或 } Q_{(i,j)} > (255 - T) \quad (8)$$

式中: $Q_{(i,j)}$ 表示当前区域中心像素值; T 表示噪声阈值(本文设定为 15)。

2) 检测模板为 3×3 区域模板,判断当前检测模板中心像素点为噪声点时,则用自适应模板替换当前检测模板,初始模板大小为 3×3 ,判断当前自适应模板内有效像素点是否占总像素点的一半及以上。若是,则利用当前模板内有效像素点的中值替换中心像素(噪声点)的灰度值;若没有,则扩大模板范围,最大模板为 7×7 (该模板为模拟 3D 金属打印实验中测试的最佳模板最大值)。

3) 使用当前改进后的双边滤波器对金属打印件图像进行降噪和平滑处理。

改进后的算法公式为:

$$BF[I]_p = \frac{1}{W_p^\wedge} \sum_{q \in \Omega^\wedge} G_{\sigma_r}(\|I_p^\wedge - I_q^\wedge\|) I_q^\wedge \quad (9)$$

$$W_p^* = \sum_{q \in \Omega^\wedge} G_{\sigma_r}(\|I_p^\wedge - I_q^\wedge\|) \quad (10)$$

式中: $\Omega^\wedge$ 表示由自适应模板替换后区域; $I_p^\wedge, I_q^\wedge$ 为替换后模板对应原 I_p, I_q 中的灰度值。

2.2 改进幅值梯度算子

传统的 Canny 算法采用 Sobel 算子仅通过对图像进行

的水平方向 (G_x) 和垂直方向 (G_y) 的梯度计算,利用传统的 Sobel 算子模板进行图像的梯度计算时,会忽略图像对角线方向上的边缘信息,造成图像边缘的漏检与丢失。因此,本文在文献[8]的基础上提出一种基于动态加权的四方向 Scharr 算子。改进这一算法通过引入水平方向、垂直方向、 45° 和 135° 这 4 个方向的梯度核,对应卷积核如图 1 所示。其成功地弥补了传统 Sobel 算子在斜向边缘检测中的不足^[11]。通过计算这 4 个方向的梯度幅值,并根据每个方向的梯度幅值占总梯度幅值的比例来进行动态加权融合,该方法能够自适应地突出图像中主导方向的边缘信息,从而提升了边缘检测的精度和鲁棒性。相较于传统的 Sobel 算子,该算子对细节和边缘部分的检测更加敏感,尤其在图像噪声较为显著时,具有更强的噪声抑制能力,可以更好地强化对金属打印件边缘细节部分的检测。

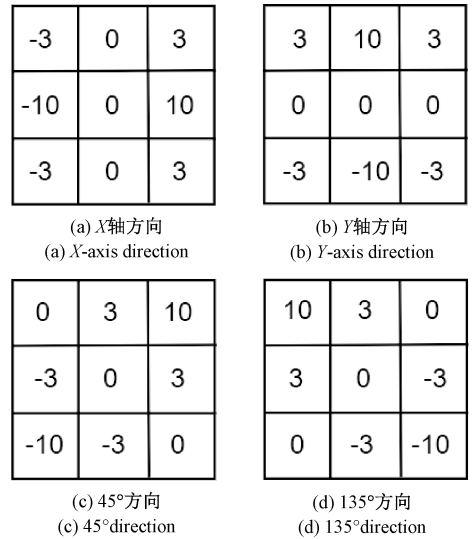


图 1 Scharr 算子卷积核

Fig. 1 Convolution kernels of Scharr operator

通过计算 4 个方向的梯度幅值并动态加权,可以得到最终的边缘检测结果。假设原图像的灰度值为 $I(x, y)$, 各方向梯度幅值计算公式为:

$$G_d(i, j) = \left| \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 K_d(m, n) I(i + m, j + n) \right| \quad (11)$$

式中: d 表示梯度方向, $d \in \{x, y, 45^\circ, 135^\circ\}$; $G_d(i, j)$ 表示该像素点在 d 方向的梯度幅值; K_d 表示 d 方向的 Scharr 卷积核。

通过每个方向的梯度幅值占总梯度幅值的比例进行加权,具体动态权重计算公式为:

$$w_d(i, j) = \frac{G_d(i, j)}{\sum_{k \in \{x, y, 45^\circ, 135^\circ\}} G_k(i, j) + \epsilon}, \quad \epsilon = 10^{-10} \quad (12)$$

$$\sum_d w_d(i, j) = 1 \quad (13)$$

式中: k 表示梯度方向, $k \in \{x, y, 45^\circ, 135^\circ\}$; ϵ 表示极小常

数,做补偿作用; $\sum_d w_d(i,j)$ 表示个梯度方向的权重之和。

最终的梯度幅值公式为:

$$G_w = \sum_d w_d G_d \quad (14)$$

最终的梯度方向则由最大的幅值决定,其公式为:

$$\theta = \operatorname{argmax}(G_d) \quad (15)$$

2.3 改进的非极大值抑制

传统非极大值抑制的处理流程为:首先找出梯度强度的非零点,然后顺着该点的梯度方向找到其相邻的两个点,如果这两个邻近点的幅值大于它们的起点,那么可以判断该点并不在边缘上,反之则可以把其作为候选的边缘点^[12]。其作用在于剔除梯度幅值非极大值点,从而细化边缘。张世鹏等^[8]提出的 NMS 算法针对工艺品裂纹检测场景设计,其核心局限集中在 3 方面:1)依赖线性插值估算非整数方向的梯度幅值,引入定位误差;2)未考虑梯度权重差异,对弱边缘抑制过度;3)插值运算导致时间复杂度达,效率不足,难以适配 3D 金属打印件“高噪声+弱边缘+实时检测”的需求。针对文献[8]中的核心缺陷,本文从定位精度、边缘保留、运算效率 3 个维度提出优化方案,核心设计如下:

1) 无差值梯度方向定位

基于四方向动态加权 Scharr 算子输出,直接定位主梯度方向,无需插值估算。其中像素 (i,j) 四方向梯度幅值 $G_x, G_y, G_{45^\circ}, G_{135^\circ}$, 动态权重为 $w_x, w_y, w_{45^\circ}, w_{135^\circ}$, 主梯度方向 θ_{main} 由式(16)确定,即:

$$\theta_{\text{main}} = \operatorname{argmax}(G_x w_x, G_y w_y, G_{45^\circ} w_{45^\circ}, G_{135^\circ} w_{135^\circ}) \quad (16)$$

式中: θ_{main} 直接对应 4 个方向的梯度角 $(0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ)$, 消除插值误差。

2) 真实梯度幅值比较机制

根据主梯度方向选取对应邻域真实像素,直接进行梯度幅值对比,邻域选取规则为:

$$\text{Neighbor}(i,j) = \begin{cases} (i,j \pm 1), & \theta_{\text{main}} = 0^\circ \\ (i \pm 1,j), & \theta_{\text{main}} = 90^\circ \\ (i \pm 1,j \pm 1), & \theta_{\text{main}} = 45^\circ \\ (i \pm 1,j \mp 1), & \theta_{\text{main}} = 135^\circ \end{cases} \quad (17)$$

局部极大值判断简化为 $G_{\text{center}} > \max(G_{\text{neigh}})$, 调用真是梯度数据避免近似误差。

3) 动态权重融合抑制

引入梯度方向权重构建双维度筛选机制,解决弱边缘抑制问题,判断规则为:

$$R(i,j) = \begin{cases} 1, & G_{\text{center}} > \max(G_{\text{neigh}}) \wedge w_{\theta_{\text{main}}} > \max(w_{\text{neigh}}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

式中: G_{center} 为中心像素梯度幅值; G_{neigh} 为邻域像素梯度幅值; $w_{\theta_{\text{main}}}$ 为中心像素主梯度方向的动态权重; w_{neigh} 为邻域像素主梯度方向的动态权重;仅当“梯度幅值最大”与“方向

权重最大”两个条件同时满足时,才保留该像素为边缘点 $R(i,j)$ 。

改进算法总结:输入四方向梯度矩阵 $\mathbf{G}$ 与权重矩阵 $\mathbf{w}$; 按式(16)计算主梯度方向 θ_{main} ; 按式(17)选取邻域像素; 按式(18)执行双维度判断,保留边缘点;最后输出细化边缘集合。

2.4 动态阈值与滞后边缘追踪

传统双阈值边缘检测方法在工业视觉检测中面临显著局限性:其高低阈值的设定依赖人工调节,导致算法的自适应能力相对不足,其人工设定双阈值容易导致边缘信息丢失^[13]。对因光照波动、金属材料表面反射特性差异而形成的成像条件变化表现出敏感性,易产生高阈值引发的边缘断裂现象与低阈值引入的伪边缘噪声。在出现边缘断裂现象时,前人采用 Square 追踪算法修复断裂边缘,其核心提取二值图像中边界信息的基本算法之一,然而,该追踪算法存在明显的缺陷:不能追踪现实生活中复杂图形的轮廓,其性能存在一定的局限性^[14]。为克服上述缺陷,本文提出一种改进的自适应双阈值边缘检测框架。首先,基于梯度统计分布特性构建动态阈值模型,通过提取非极大值抑制后非零梯度矩阵的百分位特征确定高阈值,并根据比例参数推导低阈值,实现基于数据驱动的阈值自适应优化;其次,通过传统 Canny 算子检测形成的边缘往往存在不完整、不闭合、不准确的情况。为了获取连续准确的边界,采用哈夫变换的方法检测连接边缘点设计滞后边缘追踪,将强边缘点作为种子,通过 8 邻域连通性准则对候选弱边缘进行选择增强,从而在保持边缘连续性的同时有效抑制孤立噪声^[15]。

在增材制造质量检测领域,特别是金属 3D 打印件的精密检测中,本算法展现出显著的技术优势:其一,针对金属打印件表面复杂的特征,改进的自适应阈值机制可依据局部梯度分布动态调整灵敏度,相较于传统固定阈值方法,其对弱边缘的识别准确率更高^[16]。其二,改进的区域生长策略通过建立边缘连通性约束,可有效重构断裂边缘。最后利用 Zhang-Suen 细化算法细化边缘^[17]。

动态阈值计算具体步骤包括:

1) 非零梯度筛选,公式为:

$$\mathbf{G}_{\text{non-zero}} = \{g \in \mathbf{G}_{\text{nms}} \mid g > 0\} \quad (19)$$

式中: $\mathbf{G}_{\text{non-zero}}$ 表示非零梯度值集合; $\mathbf{G}_{\text{nms}}$ 表示非极大值抑制后的图像梯度值集合。

2) 高阈值与低阈值计算,公式为:

$$T_h = P_p(G_{\text{non-zero}}) \quad (20)$$

$$T_l = \alpha T_h \quad (21)$$

式中: $P_p(\cdot)$ 表示百分位数函数; p 表示高阈值百分比(经实验研究发现, p 取 0.8 时可以应对各实验环境情景,因此本文 p 取值为 0.8); α 表示比例参数(默认为 0.5)。

3)边缘标记,标记规则为:

$$E(i,j) = \begin{cases} 255, & G_{nms}(i,j) \geq T_h \\ 127, & T_l \leq G_{nms}(i,j) < T_h \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $E(i,j)$ 表示输出标记后的像素坐标集。

滞后边缘追踪具体步骤为:

1)给定初始化矩阵 $F(i,j) = 0, F \in \{0,255\}^{h \times w}$ 、集合 $M = \emptyset$, 其中 h, w 为图像的边界,集合 M 定义为生长队列

2)强边缘标记,标记规则为:

$$\text{if } E(i,j) = 255, \quad \text{则 } F(i,j) \leftarrow 255, M \leftarrow M \cup \{(i,j)\} \quad (23)$$

3)滞后阈值连接,取出集合 M 中队首像素 (i,j) , 检查其 8 邻域 $N(i,j)$:

$$\forall (ni,nj) \in \{(i+di,j+dj) \mid (di,dj) \in \{-1,0,1\}^2 \setminus (0,0)\} \quad (24)$$

若 (ni,nj) 在图像范围内且满足以下条件:

$$E(ni,nj) = 127 \text{ 且 } F(ni,nj) \neq 255 \quad (25)$$

则更新并加入队列:

$$F(ni,nj) \leftarrow 255, M \leftarrow M \cup \{(ni,nj)\} \quad (26)$$

不断迭代执行步骤 3)直至集合 $M = \emptyset$ 为止。

利用 Zhang-Suen 细化算法细化边缘,其核心是通过迭代删除非必要边缘像素,同时保证边缘的连续性和拓扑结构不变。具体实现步骤为:

1)检测邻域像素是否为前景:

$$B(P_1) = \sum_{i=2}^9 P_i \quad (27)$$

式中: $P_i \in \{0,1\}$, 表示该邻域像素是否为前景; P_1 表示中心像素; $B(P_1)$ 表示邻域中前景像素和。且算法要求 $2 < (P_1) < 6$, 以保证删除像素后的边缘不断裂。

2)0~1 模式转换次数 $A(P_1)$

$$A(P_1) = \frac{1}{2} \sum_{i=2}^8 |P_i - P_{i+1}| + \frac{1}{2} |P_9 - P_2| \quad (28)$$

3)第 1 阶段删除条件:

$$\begin{cases} 2 \leq B(P_1) \leq 6 \\ A(P_1) = 1 \\ P_2 \times P_4 \times P_6 = 0 \\ P_4 \times P_6 \times P_8 = 0 \end{cases} \quad (29)$$

第 2 阶段删除条件:

$$\begin{cases} 2 \leq B(P_1) \leq 6 \\ A(P_1) = 1 \\ P_2 \times P_4 \times P_8 = 0 \\ P_2 \times P_6 \times P_8 = 0 \end{cases} \quad (30)$$

不断迭代细化边缘算法,当且仅当 $\Delta P = \emptyset$ 时算法收敛停止, ΔP 表示本轮迭代中被删除的像素集合。

2.5 改进 Canny 算法具体流程

本文针对 3D 金属打印件的缺陷检测所改进算法的具体流程如图 2 所示。

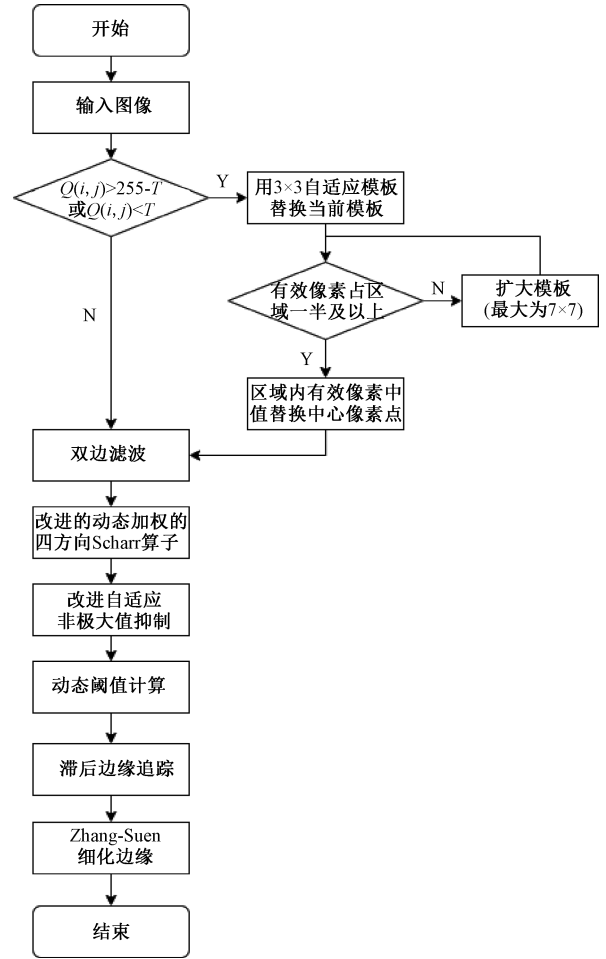


图 2 改进的 Canny 算法检测流程

Fig. 2 Detection flow of the improved Canny algorithm

3 实验结果及其分析

通过实验结果对比,分别评估改进算法在图像平滑、边缘检测的连续性方面的表现,以验证其有效性和实际应用效果。实验环境为 Windows10 操作系统,CPU 为 Intel(R) Core (TM) i7-14700HX,显卡为 NVIDIA GeForce RTX4070,内存为 32 G,仿真环境为 Python3.1.12,3D 金属打印件表面图像通过 CCD 工业相机获取,实验设备环境如图 3 所示。

3.1 图像滤波器效果实验

在实验测试中,选用 Lena 图像作为测试样本,并在图像中随机添加 10%密度的椒盐噪声以模拟实际噪声环境。通过比较分析了 4 种不同的滤波方法: $\sigma = 0.8$ 的高斯滤波、传统双边滤波、文献[4]提出的算法以及本文改进算法。图 4 展示了各方法的处理效果对比:图 4(a)为 Woman 标准图像;图 4(b)为含 10%椒盐噪声的 Woman 图像;图 4(c)为高斯滤波器实验处理结果;图 4(d)为传统双边滤波器的实验处理结果;图 4(e)文献[4]中所改进滤波器的实验处理结果;图 4(f)为本文改进双边滤波器的实验处理结果。



图 3 实验设备环境

Fig. 3 Experimental equipment environment

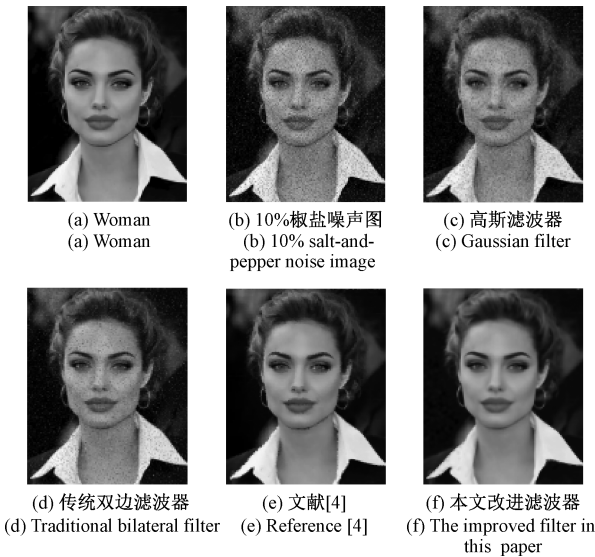


图 4 图像滤波器实验效果对比

Fig. 4 Comparison of experimental effects of image filters

实验结果表明,高斯滤波器在处理高密度椒盐噪声时表现欠佳,其平滑效果导致图像边缘模糊,从而显著影响了后续的梯度计算与边缘提取精度。相比之下,传统双边滤波器虽然能较好地保持边缘信息,但在椒盐噪声去除方面效果有限,这直接影响了后续阈值设定的准确性及边缘检测的性能。文献[4]提出的方法对椒盐噪声具有一定的抑制作用,但实验结果显示处理后的图像边缘出现撕裂情况,对后续算法处理产生一定的干扰。针对上述问题,本文提出的改进算法在椒盐噪声去除方面表现出显著优势,不仅能有效消除噪声干扰,同时较好地保留了图像的边缘结构信息,为后续图像处理任务提供了更可靠的基础。

3.2 改进的 Canny 算法实验结果

在 3D 金属打印件的实际生产加工过程中,由于模型样式存在差异性,出现的缺陷也有所不同^[18]。为了验证本文算法在研究 3D 金属打印件表面缺陷检测的优势,本研究采用不同的缺陷模板分别进行检测,根据划痕的线宽和污点大小对缺陷样本进行了有效分类^[19]。本文实验采用不同类型的 3D 金属打印件缺陷来验证本文算法的有效

性,同时采用改进算法与传统 Canny 算法、文献[5]算法进行实验结果分析,实验结果如图 5 所示。图 5(a)为原 3D 金属打印件及其各个缺陷模板图像。图 5(b)为采用传统 Canny 算法在噪声环境下对图像的处理结果,可以看出因噪声原因在处理过程中无法较好地清除噪声,导致检测结果出现边缘连续性差及虚假边缘过多的情况,实验结果并不理想。图 5(c)为文献[5]中的改进算法,其对噪声处理的结果优于传统的 Canny 算法,对缺陷边缘定位存在一定效果,但还是误检出部分的噪声,且由于滤波器处理图像产生失真导致检测边缘出现断裂,对缺陷检测效果不佳。图 5(d)为在本文算法下不同模板缺陷检测图像的结果,可以看出,本文算法对比传统 Canny 算法与文献[5]中所改进的算法而言,可以更清晰地表现出缺陷边缘,同时对噪声的抑制效果也是更佳理想。

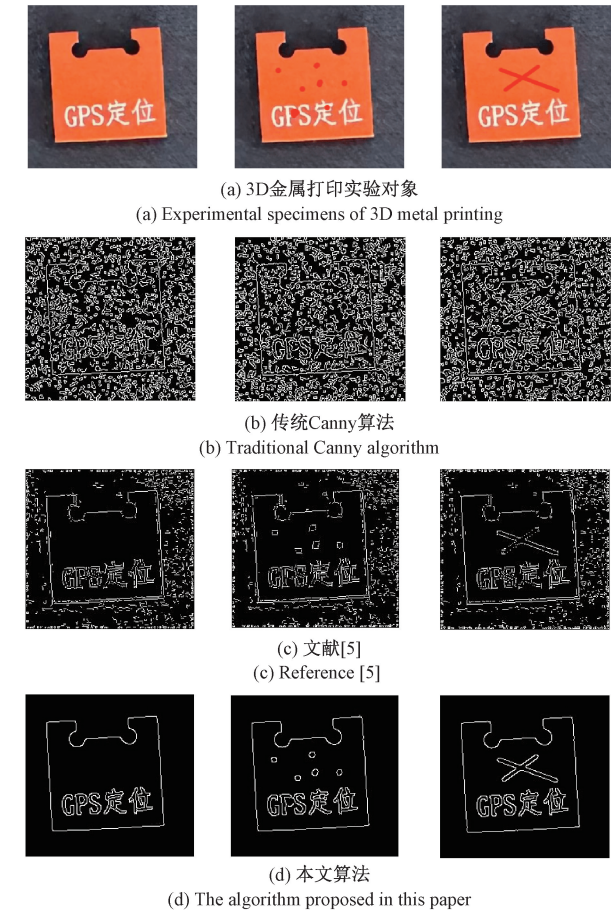


图 5 实验结果对比

Fig. 5 Comparison of experimental results

3.3 3D 金属打印件表面缺陷检测

通过本文改进的 Canny 算法对相机输出的图片进行图像边缘检测,得到算法输出的边缘图像,本实验采用越疆科技的 DobotVisionStudio4.1.2 软件进行缺陷检测,软件平台如图 6 所示。实验通过不同灰度匹配模板对边缘图像进行检测,最后经过条件检测显示图像缺陷检测结果,3D

金属打印件表面缺陷检测结果如图 7 所示。通过检测结果可得,检测结果 1 通过各个灰度匹配模板检测,检测结果 2 由于无法通过灰度匹配模板 2 的特征匹配,从而识别出存在缺陷,检测结果 3 由于无法通过灰度匹配模板 2 和 4,从而也识别出存在缺陷。这一实验结果成功表明本文算法在进行 3D 金属打印件表面缺陷检测过程中的实际应用价值。

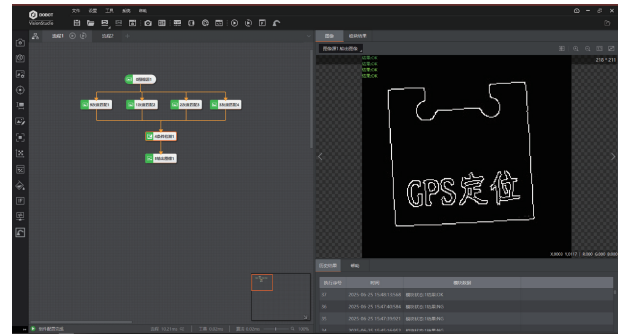


图 6 图像缺陷检测软件平台

Fig. 6 Software platform for image defect detection

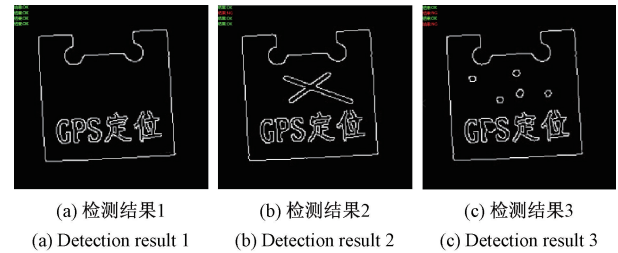


图 7 图像实验检测结果

Fig. 7 Results of image experimental detection

3.4 算法对比实验

本研究选取峰值信噪比 (peak signal-to-noise ratio, PSNR) 以及结构相似性 (structural similarity index, SSIM) 对改进前后 Canny 算法的滤波器处理后的图像进行计算^[20]。PSNR 是通常用于衡量图像重建质量的指标,其值越高,表明输出图像更接近于原图像^[21]。SSIM 从亮度、对比度、结构 3 个角度评估图像的相似性,数值越接近 1,代表图像的结构相似性越高,算法性能越优^[22]。普拉特品质因数 (probability of figure of Merit, PFOM) 主要针对边缘检测算法的性能评估,能够表示边缘检测的精度,数值越接近 1 表示边缘检测效果越佳^[23]。为了进一步验证本文所提算法对缺 3D 金属打印件缺陷边缘检测的有效性,分别设计出滤波器对比实验与算法消融实验。通过表 1 的数据可得,在对比不同滤波器的去噪和平滑图像效果的过程中,本文改进的自适应双边滤波器处理图像的峰值信噪比和结构相似性均有明显的提升,其中 PSNR 相较于高斯滤波提升 46.70%,SSIM 提升 39.93%;对比文献[4]中的自适应中值-高斯滤波器、文献[8]中的双边滤波器、文献[24]中的 Gamma 变换滤波器 PSNR 提升 15.7% 以上,SSIM 提升

10.96% 以上。由此数据可以得出,本文改进的自适应双边滤波器在去除噪声和平滑图像方面优于传统的 Canny 算法和对比文献中的滤波器。

表 1 图像滤波实验对比结果

Table 1 Comparison results of image filtering experiments

算法	PSNR/dB	SSIM
高斯滤波	21.54	0.651
中值滤波	25.32	0.735
文献[4]	28.14	0.832
文献[8]	27.31	0.821
文献[24]	29.46	0.893
本文算法	31.60	0.911

本文选用 300 张无缺样本和 200 张有缺样本混合进行模拟检测实验,采用中值滤波、Sobel 算子、最大类间方差 (Otsu) 替换本文算法对应步骤进行消融实验 (如双边滤波-本文算法即是用双边滤波器替换本文算法中改进的滤波器),与传统 Canny 算法、文献[4]、[8]、[24]中的改进算法进行对比实验,从表 2 实验数据可得,本文算法在样本检测的平均 PFOM 值为 0.932。每张样本处理的平均时间为 183 ms,略高于传统 Canny 算法,但符合实际生产的需求。算法对有缺样本的识别准确率可达 94.5%。消融实验结果表明:本文改进的滤波器在图像平滑中起关键作用,改进的梯度算子能更有效突出图像细节,改进的自适应双阈值选择可提升边缘连续性,减少因边缘断裂导致的误检;对比实验结果表明,本文算法的 PFOM 值高于所有对比算法,且在保证检测效率的同时,显著提升了缺陷识别准确率,能更清晰地凸显缺陷模板中的缺陷特征,为后续缺陷检测提供更高精度的边缘图像,更适用于实际生产检测场景。

表 2 不同算法下图像 PFOM 值

Table 2 Image PFOM values under different algorithms

算法	PFOM	平均时间/ ms	准确率/ %
传统 Canny	0.683	160	63.5
双边滤波-本文算法	0.746	182	79.0
Sobel 算子-本文算法	0.810	178	82.0
Otsu-本文算法	0.893	181	85.5
文献[4]	0.846	194	84.5
文献[8]	0.863	181	83.0
文献[24]	0.875	188	87.5
本文算法	0.932	183	94.5

4 结 论

本研究针对 3D 金属打印件在噪声环境下弱边缘难以提取、表面缺陷无法准确识别的问题开展研究:通过自适应

双边滤波优化滤波效果,实现噪声有效滤除与边缘信息保留的协同;通过改进 Scharr 卷积核,引入四方向梯度核解决边缘连续性差的问题;通过设计适配新算子的非极大值抑制方法,在减少算法运行时间的同时提升边缘定位精度;通过动态阈值与滞后边缘追踪实现双阈值自适应设定,避免人工阈值的不稳定性,保障边缘连续性;最终通过边缘细化完成缺陷边缘检测。实验结果表明,改进 Canny 算法在 3D 金属打印件表面缺陷检测中,相较于传统 Canny 算法具有更高的准确性与自适应性,可满足实际生产需求,具备一定应用价值。但该算法对色差类缺陷仍存在误检情况,未来将考虑引入深度学习与注意力机制,强化弱特征提取能力,进一步提升 3D 金属打印件缺陷检测的全面性与精度。

参考文献

- [1] 龚金铨,陈紫月,蔡心远. 金属 3D 打印技术的实际应用分析[J]. 锻压装备与制造技术,2024,59(3):75-78.
GONG J D, CHEN Z Y, CAI X Y. Practical application analysis of metal 3D printing technology [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2024, 59(3): 75-78.
- [2] 张芝威. 基于数据驱动的金属 3D 打印点阵结构缺陷检测与失效预测研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2023.
ZHANG ZH W. Research on defect detection and failure prediction of metal 3D printing lattice structures based on data-driven [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023.
- [3] 许万卫. 金属 3D 打印的激光超声检测及成像技术研究[D]. 济南:齐鲁工业大学,2022.
XU W W. Research on laser ultrasonic detection and imaging technology for metal 3D printing [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2022.
- [4] 张晓阳,何军红,牛云,等. 改进 Canny 算子在零件尺寸测量中的应用[J]. 机械科学与技术,2025,44(4): 625-631.
ZHANG X Y, HE J H, NIU Y, et al. Application of improved Canny operator in part dimension measurement[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2025, 44(4): 625-631.
- [5] 赵朝朝,江明,殷宗琨. 改进 Canny 算子下的工件尺寸测量[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(8):52-59.
ZHAO ZH ZH, JIANG M, YIN Z K. Workpiece size measurement under improved Canny operator [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(8): 52-59.
- [6] 宋倩男,刘光柱,武乐林,等. 基于 Sobel 的 FPGA 图像边缘检测系统设计[J]. 电子测量技术,2024,47(13): 68-73.
SONG Q N, LIU G ZH, WU L L, et al. Design of FPGA image edge detection system based on Sobel[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(13): 68-73.
- [7] 于新善,孟祥印,金腾飞,等. 基于改进 Canny 算法的物体边缘检测算法[J]. 激光与光电子学进展,2023, 60(22):221-230.
YU X SH, MENG X Y, JIN T F, et al. Object edge detection algorithm based on improved Canny algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(22): 221-230.
- [8] 张世鹏,牟莉. 基于改进的 Canny 算子的工艺品裂纹提取方法[J]. 计算机与数字工程,2024,52(9): 2793-2797.
ZHANG SH P, MU L. Handicraft crack extraction method based on improved Canny operator [J]. Computer & Digital Engineering, 2024, 52(9): 2793-2797.
- [9] GAO Q, ZHU M, LI D, et al. CT image quality assessment based on prior information of pre-restored images[J]. Journal of Southern Medical University, 2021, 41(2): 230-237.
- [10] 刘宇涵,闫河,陈早早,等. 强噪声下自适应 Canny 算子边缘检测[J]. 光学精密工程,2022,30(3):350-362.
LIU Y H, YAN H, CHEN Z Z, et al. Adaptive Canny operator edge detection under strong noise[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(3): 350-362.
- [11] XIONG J, WANG D SH, YIN J, et al. Precise Z-Block positioning and dimension measurement using improved Canny edge detection and sub-pixel contour fitting [J]. The Journal of Supercomputing, 2025, 81: 31.
- [12] LUO SH P, ZHANG Y X, ZHANG Z Y, et al. EPDD-YOLO: An efficient benchmark for pavement damage detection based on Mamba-YOLO [J]. Measurement,2025, 253:117638.
- [13] 王煜,朱硕,吕宗奎. 一种改进 Canny 算法在肺炎图像边缘检测中的研究与应用[J]. 计算机与数字工程, 2025,53(3):851-856.
WANG Y, ZHU SH, LYU Z K. Research and application of an improved Canny algorithm in edge detection of pneumonia images [J]. Computer & Digital Engineering, 2025, 53(3): 851-856.
- [14] 葛雷. 改进的摩尔邻域图像边缘追踪算法及应用[J]. 电脑知识与技术,2024,20(28):34-36,43.
GE L. Improved Moore neighborhood image edge tracking algorithm and its application[J]. Computer Knowledge and Technology, 2024, 20(28): 34-36,43.
- [15] 周新颖,胡跃明. 基于小波增强与 Canny 算法融合的锂

- 电池极片缺陷检测方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(4):149-154.
- ZHOU X Y, HU Y M. Lithium battery electrode defect detection method based on fusion of wavelet enhancement and Canny algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(4): 149-154.
- [16] CHEN Z G, LI Y G, CHEN X F, et al. Edge and texture detection of metal image under high temperature and dynamic solidification condition[J]. Journal of Central South University, 2018, 25: 1501-1512.
- [17] DAI Y S, YANG CH H, ZHU H Q, et al. Automatic infrared image distortion correction of electrolytic cells based on refined edge lines[J]. Measurement, 2023, 221:113509.
- [18] 秦浩东, 张颖, 赵鹏程. 改进 Canny 算子的小管径弯头漏磁缺陷图像量化方法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(5):150-157.
- QIN H D, ZHANG Y, ZHAO P CH. Image quantization method for magnetic flux leakage defect of small diameter elbow based on improved Canny operator [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(5): 150-157.
- [19] 张彪, 荀荣科, 许家忠. 基于深度学习的工业轴承缺陷检测算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(4): 136-149.
- ZHANG B, XUN R K, XU J ZH. Research on industrial bearing defect detection algorithm based on deep learning [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(4): 136-149.
- [20] NASR M, BRZOSTOWSKI K, OBUCHOWICZ R, et al. Comparative analysis of noise estimation methods in computed tomography images: Histogram analysis, L2 norm, SSIM, and CNN-based classification with ResNet50 [J]. Digital Signal Processing, 2025, 166: 105242.
- [21] 马聚超, 舒征宇, 张洋, 等. 基于改进 Hough 变换的雾中绝缘子裂纹检测与研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(13):80-87.
- MA J CH, SHU ZH Y, ZHANG Y, et al. Detection and research of insulator cracks in fog based on improved Hough transform[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(13): 80-87.
- [22] 刘红涛, 陆安江, 彭熙舜, 等. 光照不均匀下的工件图像亚像素边缘检测[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(10):1-7.
- LIU H T, LU AN J, PENG X SH, et al. Subpixel edge detection of workpiece image under uneven illumination [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(10): 1-7.
- [23] YU X K, WANG ZH W, WANG Y H, et al. Edge detection of agricultural products based on morphologically improved Canny algorithm[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021(1):6664970.
- [24] 李强, 赵峰, 许中平, 等. 基于改进 Canny 算子的电气设备红外图像边缘检测算法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(12):1759-1765.
- LI Q, ZHAO F, XU ZH P, et al. Edge detection algorithm of infrared image of electrical equipment based on improved Canny operator [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024, 57(12): 1759-1765.

作者简介

许仕林, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉图像处理。

E-mail:2120241390@glut.edu.cn

王文成(通信作者), 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为控制技术、工业电气自动化及复杂建模等。

E-mail:wwc816@163.com

陆孝杰, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉图像处理。

E-mail:zhihr1114@163.com

余智科, 硕士研究生, 主要研究方向为复杂系统控制与工业过程控制。

E-mail:2120231385@glut.edu.cn

郑诗翰, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉图像处理。

E-mail:2120231395@glut.edu.cn