

基于机器视觉的中小模数齿轮边缘图像修复方法研究

解 焱^{1,2}

XIE Yang

摘 要

针对中小模数齿轮边缘检测中的噪声干扰和边缘断裂问题,文章提出了一种基于改进的 Sobel 亚像素边缘检测算法,通过二值化预处理结合高斯滤波和形态学闭运算,有效提升了图像质量。在边缘检测阶段,通过 Sobel-Laplacian 混合算子的多方向梯度融合,使边缘检测完整度达 95.7% (较传统方法提升 13.4%),且噪声鲁棒性 (34.5 dB) 优于同类方法 20% 以上。基于梯度的边缘连接算法实现了 100% 的断点修复率,处理耗时仅 0.623 s,通过局部面积法实现边缘点亚像素精确定位,实验表明所有边缘均达到亚像素精度,满足工业检测实时性要求。

关键词

机器视觉; 齿轮边缘检测; Sobel-Laplacian 融合算子; 断点修复; 梯度融合

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.09.004

0 引言

谐波减速器作为精密传动系统的核心部件,其齿轮边缘检测精度直接影响传动性能。其中困难有齿槽狭窄导致的边缘断裂,表面纹理引发的伪边缘干扰,以及要达到亚像素级定位的需求,现研究虽有一定进展,但均存在显著局限。包启龙等人^[1]提出改进 Canny 算法,通过 Otsu 阈值迭代优化将轨道边缘检测准确率提升至 89%,但在小模数齿轮测试中仍产生 22.3% 的断裂边缘。孔祥阳等人^[2]研发的红外偏振增强算法虽能将边缘信噪比 (SNR) 提高至 25.6 dB,但其针对红外图像设计的互结构约束导致在可见光下的齿轮检测完整度仅为 76.8%。陶兆胜等人^[3]的分段修复算法通过模板匹配将图像熵优化 15%,但对齿根圆角等模糊区域修复失败率达 34.7%。

本文提出一种改进的基于 Sobel 算子的亚像素边缘检测方法。针对小模数齿轮的边缘提取问题,通过构建 Sobel-Laplacian 融合算子,将边缘检测完整度提升至 95.7%。在噪声鲁棒性方面达到 34.5 dB,较现有方法提升 20% 以上。基于梯度连接方法实现了 100% 的断点修复率,并采用局部面积亚像素检测技术使边缘定位精度达到亚像素级。实验结果表明,该方法能够有效获取钢轮完整的亚像素边缘图像。

1 图像预处理

1.1 图像处理流程

齿轮图像测量流程的关键在于提高图像处理的效率和准

确性,以确保边缘信息的可靠性。具体操作步骤如下:

首先,将采集到的彩色图像转换为灰度图像^[4],接着将灰度图像转换为仅包含黑白像素的二值图像,通过设定最佳阈值进行像素分类,为后续边缘提取奠定基础;完成二值化后,采用高斯滤波平滑图像,结合形态学闭操作填补微小孔洞并连接断裂边缘,进一步提升图像质量;最后,运用改进的基于 Sobel 算子的亚像素边缘提取方法,实现亚像素级别的边缘定位,精确捕捉齿轮的轮廓细节,如图 1 所示。

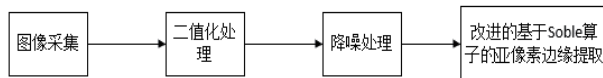


图 1 齿轮图像处理流程

1.2 二值化转换

图像二值化是图像处理中的一项关键技术,其核心作用是将具有连续灰度变化的图像转换为仅包含黑白两种像素的二值图像。这种转换不仅简化了图像数据,更为后续的边缘检测、特征提取等处理步骤奠定了重要基础。如图 2 和图 3 所示,二值化处理后的图像能够更清晰地呈现目标轮廓,显著提升后续分析的效率和准确性。

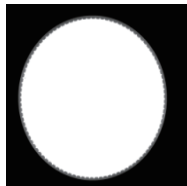


图 2 原图



图 3 二值化处理图

1.3 降噪处理

二值化后的图像常包含椒盐噪声、小孔洞或边缘毛刺等

1. 南京工程学院工业中心 江苏南京 211167

2. 南京工程学院机械工程学院 江苏南京 211167

噪声，这些噪声会影响后续的特征提取与分析。为消除噪声干扰，通常采用高斯滤波和形态学闭操作进行降噪处理。高斯滤波通过加权平均平滑图像^[5]，其二维高斯核定义为：

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

式中：(x,y) 为滤波器中心点的坐标； σ 为高斯分布的标准差。

形态学闭操作（先膨胀后腐蚀）能填充细小孔洞并平滑边缘^[6]，其表达式为：

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B \quad (2)$$

式中：A 为输入的二值图像；B 为结构元素； $\oplus$ 为膨胀运算； $\ominus$ 为腐蚀运算。

降噪处理后如图 4~5 所示。



图 4 二值化原图

图 5 降噪图

2 改进的基于 Sobel 算子的亚像素边缘提取

在谐波减速器中，钢轮的几何精度和表面质量对系统性能至关重要。为了提高边缘检测的精度，改进的 Sobel 亚像素边缘提取算法在传统边缘检测的基础上进行了优化：通过多尺度梯度融合和方向一致性校验，精准捕捉钢轮齿廓的细微边缘特征；利用形态学修复和基于梯度引导的断点连接，消除边缘断裂，形成完整的初始轮廓；最终结合局部面积法亚像素定位技术，将边缘定位精度提升至亚像素级，从而得到高精度的钢轮完整边缘图。该方法显著降低了齿形误差测量中因像素离散化导致的阶梯效应，为谐波减速器的装配精度评估提供了更可靠的依据^[7]。

2.1 边缘检测

传统的边缘检测算法如图 6 所示，主要包括 Canny 算子、Prewitt 算子、Laplacian 算子以及 Sobel 算子等^[8]。

从图 6 的实验结果可以看出，不同传统边缘检测算法在钢轮齿形检测中各具特点：Sobel 算子虽然具有较好的噪声抑制能力，边缘连续性较优，但在复杂齿形轮廓中容易产生伪边缘；Laplacian 算子对边缘细节敏感，能准确反映齿廓的细微变化，但其对噪声的抑制能力明显不足；Canny 算子在处理小模数齿轮时，由于齿槽狭窄导致边缘信息丢失，出现明显的边缘断裂现象；而 Prewitt 算子则因梯度计算方式简单，在齿尖等关键部位会产生较多虚假边缘，严重影响测量精度。

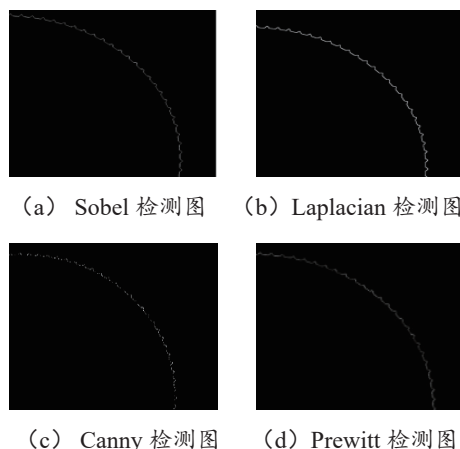


图 6 边缘检测对比图

综合比较，若追求计算效率和一定的噪声鲁棒性，Sobel 算子常被视为较优选择，适用于多种应用场景，Laplacian 具有较好的连接性。首先，采用 Sobel 算子对图像进行边缘检测。Sobel 算子属于一阶导数算子，能够在一定程度上抑制噪声。它通过计算图像在水平和垂直方向的梯度来识别边缘^[9]。其水平方向和垂直方向的卷积核分别为：

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

当图像在点 (x,y) 处，图像的梯度幅值 G 和方向 θ 可以用公式计算为：

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (4)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (5)$$

式中：G 表示梯度幅值； θ 表示梯度方向。

其次是对图像进行拉普拉斯边缘检测，拉普拉斯算子作为二阶导数算子，在二维离散空间中，拉普拉斯算子的常见形式为：

$$\text{Laplacian}(I) = \Delta I = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

对图像 I 进行拉普拉斯运算，得到的响应 L 为：

$$L = \nabla^2 I = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \quad (7)$$

式中：L 表示拉普拉斯运算后的响应；I 表示图像经过拉普拉斯算子运算后的结果，其中包含了图像的边缘和细节信息。

在融合过程中，首先对图像分别应用拉普拉斯算子和 Sobel 算子，以获得各自的边缘图像；接着设定融合后的图像像素值可以将其直接融合计算方式为：

$$F = S + L \quad (8)$$

式中： F 为融合后的像素值； L 为拉普拉斯边缘图像； S 为Sobel边缘图像。

融合后如图7~8所示。融合后，从表1参数可以看出，通过对比Sobel算子、Laplacian算子及融合算法在边缘完整度、噪声鲁棒性，融合的算法在边缘完整度达到95.7%，优于单独使用Sobel（82.3%）和Laplacian（88.1%）。此外，融合算法的噪声鲁棒性（34.5 dB）远超Laplacian（<20 dB），并较Sobel（28.1 dB）进一步提升22.8%。综上，融合算法在精密测量场景中更具适用性，而Sobel算子更适合实时性要求较高的应用^[10]。

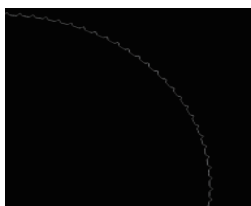


图7 Sobel边缘处理图

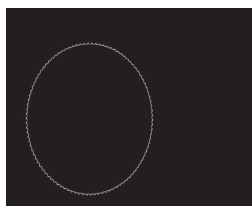


图8 融合后的边缘处理图

表1 边缘检测算法性能对比

算法	边缘完整度/%	噪声鲁棒性/dB
Sobel边缘检测	82.3	28.1
Laplacian边缘检测	88.1	<20
融合算法	95.7	34.5

2.2 边缘修复

在图像处理领域，边缘检测算法虽然能够有效提取图像特征，但其输出往往呈现为离散的边缘点^[11]，导致边缘不连续、不光滑，严重影响后续的图像分析和特征提取精度。针对这一关键问题，本研究系统地分析和改进了边缘连接技术。

传统基于邻域的连接方法通过分析局部像素相似性实现边缘连接，但存在显著缺陷。从图9中可以看出，边缘定位精度下降产生大量的会离散的噪点，导致错误的伪边缘连接。因此本文提出基于梯度方向一致性的边缘连接方法。从图10可以看出，该算法利用梯度信息精确地判断边缘的走向，避免产生离散的伪边缘点，保持原始的边缘定位，获得了更完整的边缘连接效果。



图9 基于邻域的连接方法图



图10 基于梯度连接方法图

实验表明，表2~3中基于邻域的连接方法平均耗时达0.754 s，仍有4 316个未连接断点，难以满足小模数齿轮高

精度检测的严苛要求。相比之下，本文提出的方法显著提升了性能：在时间处理上平均时间缩短到0.623 s（提升了17.4%），并对边缘断点进行了完全修复，无残留未连接点，边缘重合率达100%，完全适配小模数齿轮的检测需求。

表2 连接时间对比图

	基于梯度的连接时间/s	基于邻域的连接时间/s
1	0.698	0.711
2	0.499	0.697
3	0.597	0.654
4	0.698	0.954
平均用时	0.623	0.754

表3 连接断点对比图

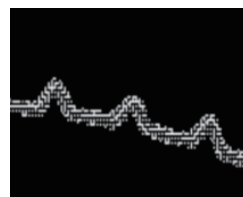
方法	断点数	修复后的断点数	轮廓重合度
基于邻域的连接方法	15 516	4 316	1
基于梯度连接方法	15 516	0	1

2.3 亚像素边缘检测

在完成前期操作后，考虑到对于钢轮的检测通常需要较高精度以确保其质量和性能，并对图像进行亚像素边缘检测，常见的亚像素边缘检测方法如图11有矩法、拟合法、插值法、局部面积法^[12]。



(a) 矩法



(b) 拟合法



(c) 插值法



(d) 局部面积法

图11 亚像素边缘对比图

由图11可以看出，矩法利用边缘点的统计特性，能够提供更稳健的边缘位置信息，但是检测会出现大量的分布杂乱无章的离散点，可能是矩法对图像中的噪声较为敏感。噪声干扰导致矩阵运算出现偏差，使得检测出的边缘点偏离真实位置，影响边缘检测的准确性和稳定性。拟合法可以根据需求选择不同的拟合曲线和模型，灵活性较高，但是对小模数检测会导致对细节方面无法兼顾，产生大量的离

散点,说明拟合函数无法准确反映边缘特征,拟合误差大,边缘检测结果精度低,对钢轮复杂形状边缘检测效果不佳。插值法是通过已知点估算未知点,但插值算法在钢轮边缘处产生不连续或突变,形成离散点。这些离散点意味着插值过程不能平滑过渡,在边缘检测中会造成边缘位置偏差,影响检测准确性^[13]。

因此,本文选用局部分面积法进行亚像素边缘检测。该方法通过对局部区域开展精细分析,可实现较高精度的亚像素边缘定位。如表4所示,针对5个随机选定的不同位置,局部分面积亚像素边缘检测方法所获取的坐标均达到了亚像素级精度。

表4 亚像素边缘检测结果

	初始坐标	局部分面积坐标
1	(1 007 356)	(1 007.11 356.56)
2	(1 008 356)	(1 007.90 356.25)
3	(1 009 356)	(1 009.00 356.33)
4	(1 010 356)	(1 010.00 356.33)
5	(1 011 356)	(1 010.87 356.30)

3 结语

本文针对中小模数齿轮边缘检测中的噪声干扰、断裂及亚像素定位难题,本文提出基于改进的 Sobel 亚像素边缘检测算法,通过创新性结合 Sobel-Laplacian 混合算子与梯度方向一致性修复算法,实现了 95.7% 的边缘完整度与断点修复率,噪声鲁棒性(34.5 dB)较传统方法提升 20% 以上。边缘修复处理耗时仅 0.623 s,断点修复达到 100%,局部分面积法的使边缘均达到亚像素定位,满足工业实时检测需求。具体最终效果如图 12 所示。

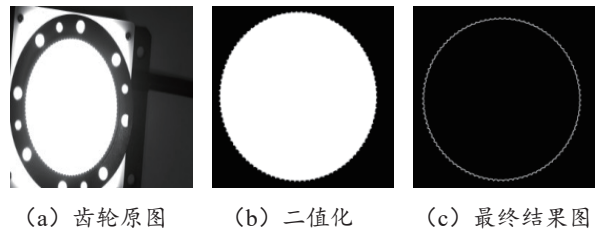


图 12 最终实验结果图

参考文献:

[1] 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.
[2] 孔祥阳,赵永强,彭群聶,等.基于互结构正则约束的红外偏振图像增强算法[J].光子学报,2020,49(5):160-165.

[3] 陶兆胜,张敬寒,王磊,等.基于边缘特征和像素结构相似度的图像修复算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2019,31(10):1768-1776.
[4] 陈健.基于机器视觉的图像处理与尺寸检测研究[J].河南工程学院学报(自然科学版),2022,34(3):61-64.
[5] 杨伟婷,李保育,左文斌.基于机器视觉的图像处理方法[J].信息技术与信息化,2021(7):143-145.
[6] 左孝林.基于机器视觉的小模数齿轮批量快速测量方法研究[D].洛阳:河南科技大学,2020.
[7] CHAI H X.Measurement method for geometric parameters of small module gears based on machine vision[J].International journal of frontiers in engineering technology, 2024, 6(1): 060115.
[8] 张志勇,潘宁慧,赵廷玉.基于标准差加权高斯滤波函数及多方向 Sobel 算子的感兴趣区域中心子区图像期望清晰度值计算方法[J].激光与光电子学进展,2024,61(18):395-403.
[9] 丁一川,耿聪,刘金雄.基于改进的多方向 Sobel 算子的车道线边缘检测方法研究[J].北京汽车,2025(1):23-29.
[10] 孟祥意,刘德全,管浩洋.基于 FPGA 的一种改进 Sobel 边缘检测算法设计与实现[J].电脑知识与技术,2024,20(33):11-14.
[11] 刘彪,袁文海,董小顺,等.基于改进边缘连接 Canny 算法的绝缘子憎水性图像分割研究[J].高压电器,2022,58(1):162-169.
[12] 刘明佩,朱维斌,叶树亮.基于改进 Zernike 矩的小模数齿轮亚像素边缘检测[J].仪器仪表学报,2018,39(8):259-267.
[13] XU H R, HE J Z, ZHU J R, et al.Displacement measurement of shaking table experiments based on binocular vision and subpixel optimization[J].Journal of physics: conference series, 2023, 2577: 012004.

【作者简介】

解畅(1998—),男,山西运城人,硕士研究生,研究方向:机器视觉, email:810520735@qq.com。

(收稿日期:2025-04-24 修回日期:2025-09-15)