

基于 Canny-Devernay 的算法芯片缺陷边缘检测

宋康康¹ 张俊生² 仝晓刚² 张红宇¹

SONG Kangkang ZHANG Junsheng TONG Xiaogang ZHANG Hongyu

摘要

为提高在噪声较多的图像中集成电路封装缺陷图像分析的精度和连续性,文章提出了一种改进的边缘检测方法,即 Canny-Devernay 亚像素边缘检测算法。首先,采用均值滤波对图像进行平滑去噪,并利用直方图均衡化增强图像对比度。其次,计算图像的梯度,确定边缘点,并连接这些边缘点以形成连续的边缘轮廓。最后,通过细化边缘,获得了精确的图像边缘位置信息。与传统 Canny 边缘检测算法相比,Canny-Devernay 亚像素边缘检测算法在准确度、回归率、精确率分别提高了 11.93%、11.06%、15.55%。

关键词

封装缺陷; Canny 边缘检测; Canny-Devernay 亚像素边缘检测; 中值滤波; 直方图均衡化

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.04.018

0 引言

封装芯片的制造过程中,边缘检测是非常关键的一个环节,对芯片的精确放置和焊接质量有直接影响。目前,文献[1-5]封装芯片边缘检测技术主要基于图像处理和机器学习算法,但在高精度要求、复杂环境下的检测以及自动化水平的提升等挑战面前,这些技术仍存在一定的局限性。

在边缘检测领域,研究人员提出了多种创新方法,以

提高检测的精度和适应性。文献[6]采用直方图均衡化与同态滤波的空频结合处理,对图像进行边缘检测,能够准确识别动作,但会出现误判的结果。文献[7-8]采用形态滤波和 Otsu 优化、Canny 算子进行边缘检测,梯度差分和 Otsu 等方法缺陷会出现,但是精度不够。文献[9]采用利用霍夫变换改进的 Canny 算子边缘检测方法,但是会出现运行时间长。文献[10]采用小波去噪的算法处理钢表面,检测效果很好,但是精度不够。文献[11-12]采用 LOG 算子和 Scharr 算子,检测边缘检测有可能无法有效检测。文献[13-14]采用基于多方向各向异性高斯方向导数的 Sobel 算子对 NEQR 量子图像进行边缘提取时,存在边缘区域无法被识别的问题。

本文采用基于 Canny-Devernay 的亚像素边缘检测算法。

1. 太原师范学院计算机科学与技术学院 山西晋中 030619

2. 太原工业学院电子工程系 山西太原 030008

[基金项目] 太原市“双百攻关行动”揭榜挂帅项目 (2024TYJB0126)

[6] XU W Y, XIA T, JING C Q. Background modeling from video sequences via online motion-aware RPCA[J]. Computer science and information systems, 2021, 18: 29.

[7] GOWDA V B, GOPALAKRISHNA M T, MEGHA J, et al. Background initialization in video data using singular value decomposition and robust principal component analysis[J]. International journal of computers and applications, 2023, 45(9): 600-609.

[8] TANNER J, VARY S. Compressed sensing of low-rank plus sparse matrices[J]. Applied and computational harmonic analysis, 2023, 64: 254-293.

[9] MOORE B E, GAO C, NADAKUDITI R R. Panoramic

robust PCA for foreground-background separation on noisy, free-motion camera Video[J]. IEEE transactions on computational imaging, 2019, 5(2): 195-211.

[10] LIN Z C, LI H, FANG C. Alternating direction Method of multipliers for machine learning[J]. Alternating direction method of multipliers for machine learning, 2022: 1-9.

【作者简介】

王巍凤(1999—),女,河南南阳人,硕士研究生,研究方向:基于四元数 RPCA 的视频背景建模。

(收稿日期: 2024-12-11)

首先,使用均值滤波和直方图均衡化进行图像去噪和图像增强,以提供更清晰、对比度更高的图像基础。然后,对处理后的图像进行梯度计算、边缘点检测、边缘点连接以及利用阈值和滞后效应进行边缘检测。

1 Canny 边缘检测算法

Canny 边缘检测算法是一种经典的计算机视觉技术,如图 1 所示,其流程包括:首先对原始图像进行高斯滤波以平滑噪声,然后计算图像的梯度和方向,接着通过非极大值抑制去除伪边缘,再使用双阈值策略连接边缘,最后输出包含清晰边缘的图像。

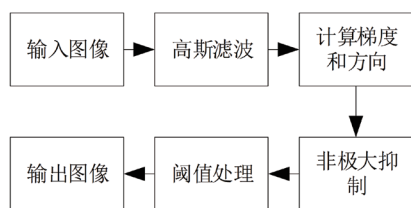


图 1 Canny 边缘检测流程图

1.1 高斯滤波

在图像获取和传输中可能会受到各种噪声的影响,高斯滤波能有效地平滑这些噪声,使得图像更加干净;高斯滤波是线性滤波,能够更好地保留边缘和图像的细节信息;高斯滤波还能减少假边缘的效果,可以提高边缘的准确性和鲁棒性。二维高斯滤波的卷积核可以表示为:

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

式中: $G(x,y)$ 表示高斯函数; σ 表示滤波器的标准差。

1.2 计算梯度增幅和方向

$$M(x,y) = \sqrt{G_x^2(x,y) + G_y^2(x,y)} \quad (2)$$

$$\theta(x,y) = \tan^{-1}\left(\frac{G_y(x,y)}{G_x(x,y)}\right) \quad (3)$$

1.3 非极大值抑制

非极大值抑制是边缘检测的关键步骤,通过仅保留局部梯度最大的点,确保边缘的精细和清晰。这一过程消除了梯度大的非边缘像素,减少了伪边缘,提高了边缘检测的鲁棒性,并为后续的双阈值处理和边缘跟踪提供了精确的数据基础。

1.4 双阈值处理

双阈值处理在边缘检测中用于区分强边缘、弱边缘和无效边缘,以减少噪声影响并保持边缘的连续性和完整性。通过设定高、低两个阈值,梯度值大于高阈值的像素被标记为强边缘,小于低阈值的为非边缘,介于两者之间的为弱边缘。

弱边缘通过边缘跟踪与强边缘连接,确保边缘的连贯性,减少断裂。

2 基于 Canny-Devernay 亚像素边缘检测算法

在传统 Canny 边缘检测算法中,高阈值和低阈值选取较主观,选择不同阈值会影响检测结果。虽经高斯滤波降噪,但在高噪声图像中性能易受干扰,且固定阈值不适用于边缘强度变化大的图像,可能导致边缘检测结果模糊、丢失。

Canny-Devernay 亚像素边缘检测算法可解决这些问题:先用均值滤波和直方图均衡化进行图像去噪与增强,再对处理后的图像进行梯度计算、边缘点检测、连接及利用阈值和滞后效应检测边缘,能高精度定位边缘,提高测量分辨率,减少定位误差,提升图像质量,适用于高精度检测,可优化后续处理,结合初步边缘检测与高精度定位,保持运算效率的同时获取更精确边缘信息。

2.1 图像预处理

2.1.1 均值滤波

高斯滤波能有效减少噪声,但可能导致图像模糊和边缘信息丢失,影响后续图像分析和处理。均值滤波作为预处理步骤,通过抑制随机噪声和平滑处理,提高信噪比,为边缘检测提供更清晰的基础。均值滤波有效地去除了图像中的噪声,减少了随机噪声的影响,使图像更加平滑,降低噪声对图像质量的影响,并且在边缘检测和特征提取中减少了噪声带来的干扰。然而,这种滤波算法对于图像中较小的目标可能导致其与背景混淆,而较大的目标则相对容易检测。

$$I'(x,y) = \frac{1}{mn} \sum_{i=-\frac{m-1}{2}}^{\frac{m-1}{2}} \sum_{j=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} I(x+i,y+j) \quad (4)$$

式中: I 表示原始图; $I'(x,y)$ 表示滤波后的图像; mn 表示滤波窗口的大小; $(x+i,y+j)$ 表示滤波窗口内的像素坐标; $I(x+i,y+j)$ 表示这些像素的灰度值。

2.1.2 直方图均衡化

为克服均值滤波后图像边缘模糊的问题,可以采用直方图均衡化方法。此方法通过调整图像的灰度分布,增加边缘与背景之间的对比度,从而使得边缘特征更为显著。这种对比度的提升对于边缘检测算法至关重要,因为它能够帮助算法更精确地识别和定位边缘,尤其是在图像的低对比度区域或是光照不均匀的情况下。此外,直方图均衡化处理后,图像对于不同的场景和光照条件具有更好的适应性,增强了边缘检测算法的普适性。直方图均衡化的计算过程涉及根据像素灰度级的概率分布对灰度级进行调整,以实现灰度级的均匀分布。

$$s_k = T(r_k) = (L-1) \sum_{j=0}^k P_r(r_j) \\ = (L-1) \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{N} (k=0,1,\dots,L-1) \quad (5)$$

2.2 Canny-Devernay 算法流程

Canny-Devernay 亚像素边缘检测算法计算图像梯度、边缘点、连接边缘点、使用阈值和滞后效应检测边缘具体步骤如下。

(1) 计算图像的梯度

在图像处理中，梯度通常是计算图像亮度的差分来得到的，对于二维图像，梯度有两个分量：水平分量 G_x 和垂直分量 G_y ，这两个分量可以通过以下中心差分计算公式分别为：

$$G_x(x, y) = I(x+1, y) - I(x-1, y) \quad (6)$$

$$G_y(x, y) = I(x, y+1) - I(x, y-1) \quad (7)$$

(2) 计算边缘点

首先确定边缘点的类型，根据像素点的梯度模长以及梯度方向，将边缘点分为水平边缘点和垂直边缘点；其中水平边缘点像素点的梯度模长大于左右相邻的梯度的模长，且 x 方向梯度分量大于或等于 y 方向梯度分量；垂直边缘点像素点的梯度模长大于上下相邻像素点的梯度模长，且 y 方向梯度分量大于或等于 x 方向梯度分量；当像素点的梯度模长同时满足水平和垂直边缘点的条件时，根据约定将其标记为水平边缘点。

$$a = |g(x - \theta_z, y - \theta_y)| \quad (8)$$

$$b = |g(x, y)| \quad (9)$$

$$c = |g(x + \theta_z, y + \theta_y)| \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{a-c}{2(a-2b+c)} \quad (11)$$

$$e_x = x + \lambda \theta_z \quad (12)$$

$$e_y = y + \lambda \theta_y \quad (13)$$

式中： a 、 b 、 c 在图像梯度场 G 在点 $(x-\theta_z)$ 、 (x, y) 、 $(x+\theta_z, y+\theta_y)$ 梯度值的绝对值； λ 是通过比较相邻点的梯度值来计算的，用于确定亚像素边缘点的精确的位置； e_x 和 e_y 分别是亚像素点在 x 、 y 方向上的坐标；其次对亚像素精度校正，计算边缘点在梯度方向上的偏移量校正之后存在 (e_x, e_y) 坐标上。这一方法有效提高了边缘的精度，为后续的边缘点链化提供前提。

(3) 连接边缘点

基于边缘点之间的距离、梯度方向和连接方向，将独立的边缘点链化成多边形曲线，从而提取图像的轮廓。使用欧几里得距离来计算边缘点之间的距离，对于边缘点 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ，其距离公式为：

$$d(e, n) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (14)$$

使用向量旋转 90° 来判断边缘点之间的连接方向是否一致，对于向量 v ，其旋转 90° 后的向量：

$$v^T = (-y, x) \quad (15)$$

对于计算 e 预期 5×5 邻居区域内的边缘点集合 $NE(e, 2)$ 对 $NE(e, 2)$ 分为两类：如果 $v_1 \times v_2$ 大于 0 且旋转 90° 向量大于 0，则表示与 e 的梯度方向一致且连接方向相同的边缘点；另外一种情况 $v_1 \times v_2$ 小于 0 且旋转 90° 向量小于 0，则表示与 e 的梯度方向一致且连接方向相反的边缘点，使前者作为前向链化候选点，后者作为后向链化候选点。

(4) 使用阈值和滞后效应检测边缘

运用阈值与滞后效应相结合的方法进行图像边缘检测，去除虚假边缘点，保留真实边缘点。具体操作为：遍历图像像素点，当相邻像素点为边缘点且当前像素点梯度模大于高阈值时，标记为边缘点；通过滞后阈值连接边缘点，若相邻像素点梯度模小于低阈值则断开连接，反之则标记为边缘点。该方法有效提高了边缘检测的准确性，更好地识别真实边缘，减少假边缘产生，如表 1 所示。

表 1 Canny-Devernay 亚像素边缘检测结果

检测种类	Canny 边缘检测 (Acc/Prec/Rec)	Canny-Devernay 亚 像素边缘检测 (Acc/Prec/Rec)
落点偏	0.75/0.74/0.75	0.80/0.82/0.86
少件	0.76/0.79/0.70	0.82/0.79/0.81
少线	0.71/0.72/0.73	0.79/0.82/0.88
芯片上异物	0.72/0.78/0.79	0.81/0.85/0.83
焊点上异物	0.71/0.76/0.70	0.84/0.85/0.84
翘丝	0.72/0.70/0.72	0.82/0.86/0.87

注：Acc 代表准确率；Prec 代表精准率；Rec 代表回归率

2.3 实验结果与分析

实验显示 Canny-Devernay 亚像素边缘检测在各检测任务中均优于 Canny 边缘检测，所有指标（准确率、精准率、回归率）性能更优。具体而言，Canny-Devernay 亚像素边缘检测在不同检测种类上的总体平均准确率提升 11.93%，精准率提升 11.06%，回归率提升 15.55%。

3 结论

在针对封装缺陷图像完整边缘轮廓提取的研究中，本文创新性地提出了一种融合 Canny 算法与 Devernay 亚像素边缘检测的改进算法，取得了显著成效。

具体流程如下：首先对图像执行预处理操作，包含均值滤波以平滑图像、抑制噪声，以及直方图均衡化来增强图

像对比度,使图像细节更为清晰,为后续处理奠定良好基础。接着计算图像梯度,精准定位边缘位置,此步骤为边缘检测提供了关键指标。随后识别并标记检测到的边缘点,通过连接这些分散的边缘点构建连贯的边缘轮廓,对图像中对象和形状的准确识别至关重要。最后,运用阈值处理结合滞后效应优化边缘检测,有效降低误报率,提升检测准确性,进而提取出更为精确的边缘信息。图2实验结果有力证明,该算法不仅能有效去除图像噪声,还能成功获取完整的边缘轮廓信息,且在性能表现上十分出色。总体平均准确率提升11.93%、精准率提升11.06%、回归率提升约15.55%,充分彰显了本文算法在封装缺陷图像边缘轮廓提取领域的优越性与实用性。

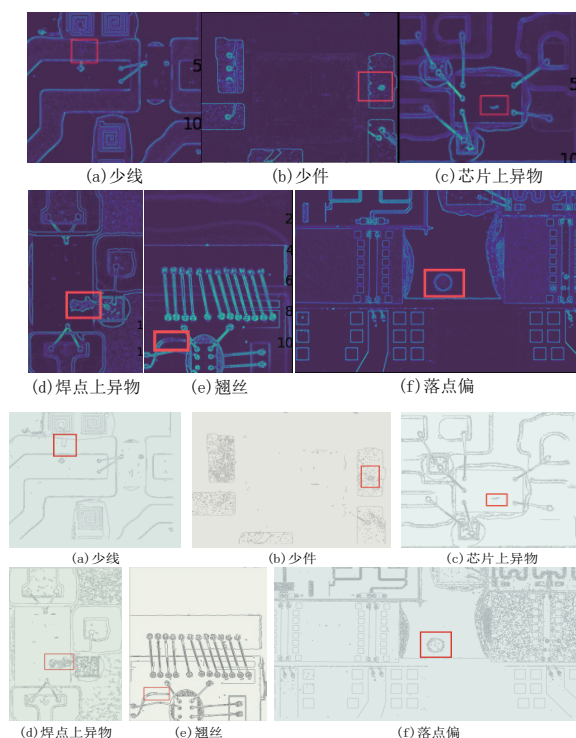


图2 Canny-Devernay 边缘检测结果

参考文献:

- [1] 孙怀义,莫斌,杨璟,等.芯片表面检测自动化系统的设计与实现[J].自动化与仪器仪表,2020(6):57-58.
- [2] 王文庆,庞颖,刘洋,等.基于可变形卷积的图像边缘智能提取方法[J].西安邮电大学学报,2021,26(1):84-89.
- [3] KUMAR A, RAHEJA S. Edge detection using guided image filtering and enhanced ant colony optimization[J].Procedia computer science,2020,173:8-17.
- [4] ORUJOV F, MASKELIŪNAS R, DAMAŠEVIČIUS R, et al. Fuzzy based image edge detection algorithm for blood vessel detection in retinal images[J]. Applied soft computing

journal,2020,94:106452.

- [5] KANIMOZHI M, SUDHAKAR M S. Bernstein approximation-based adaptive local thresholding for enhanced edge detection[J].Computers and electrical engineering, 2024, 118: 109397.
- [6] 彭兆东,涂琦玉,彭烨超.基于Canny边缘检测的空频结合图像增强算法[J].工业控制计算机,2024,37(4):106-108.
- [7] 王静,唐文豪.结合梯度差分 and Otsu 自适应边缘检测算法[J].现代电子技术,2022,45(7):41-46.
- [8] 李志远,王光辉.基于传统边缘算子的车道线识别研究[J].现代电子技术,2024,47(7):61-65.
- [9] 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.
- [10] 崔莹,赵磊,李恒,等.基于小波去噪与改进Canny算法的带钢表面缺陷检测[J].现代电子技术,2024,47(4):148-152.
- [11] 李平,张勇,田忠彬,等.基于改进LOG算子的雷达图像边缘检测算法[J].空天预警研究学报,2024,38(1):16-20.
- [12] 姜琛,田鹏,王璐.基于Schar算子的量子图像边缘检测算法[C]//中国自动化学会.2023中国自动化大会论文集.仁怀:茅台学院,2023:629-636.
- [13] AN Y, JING J F, ZHANG W C. Edge detection using multi-directional anisotropic gaussian directional derivative[J].Signal, image and video processing, 2023, 17: 3767-3774.
- [14] LIU W J, WANG L. Quantum image edge detection based on eight-direction sobel operator for NEQR[J].Quantum information processing, 2022, 21(5): 1919.

【作者简介】

宋康康(1998—),男,安徽亳州人,硕士,研究方向:图像处理与识别、缺陷检测, email:songkang22134@163.com。

张俊生(1981—),通信作者(email:45993095@qq.com),男,山西忻州人,博士,教授,研究方向:图像处理。

全晓刚(1981—),男,山西大同人,博士,副教授,研究方向:图谱成像, email:txg929@163.com。

张红宇(1999—),男,江苏连云港人,硕士,研究方向:图像处理与识别、缺陷检测, email:zhy3090@163.com。

(收稿日期:2024-12-03)