

# 基于多视图融合的微弱缺陷检测增强方法

邵天成<sup>1,2</sup>, 吴静静<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 电池金属表面浅划伤、浅凹陷等微弱缺陷在传统二维图像中对比度低、与背景纹理难区分等问题, 降低了缺陷的检出率; 为解决以上问题, 提出了一种基于多视图融合的微弱缺陷检测增强方法; 针对微弱缺陷在不同光源方向下合成的三维信息存在缺失问题, 提出通过多方向光源装置采集八张不同光源角度图像增加金属表面的光度信息; 通过改进的八方向光度立体简化模型获取金属表面三维信息, 凸显缺陷的三维特征; 针对微弱缺陷在深度图像中存在的图像模糊、对比度低下等问题, 通过分析微弱缺陷高度特征呈现角度敏感性特点, 拆分抽取深度相关性高的三维信息分量图, 由融合系数融合得到增强图像, 提高了微弱缺陷的对比度; 实验结果表明, 该方法应用于实际金属表面缺陷图像检测中, 检测精确率提升了 19.8%, 召回率提升了 18.9%, 能够较好地解决金属表面微弱缺陷图像检测对比度低下的问题。

**关键词:** 金属表面; 机器视觉; 光度立体视觉; 图像融合; 图像增强

## Enhanced Method for Faint Defects Detection Based on Multi-View Fusion

SHAO Tiancheng<sup>1,2</sup>, WU Jingjing<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** There are faint defects such as shallow scratches and dents on the surface of battery metals, resulting in low contrast and difficulty to distinguish them from background texture in traditional 2D images, and reducing detection accuracy. To address these issues, an enhanced detection method based on multi-view fusion for faint defect identification is proposed. Aimed at the missing 3D information synthesized by faint defects in different lighting resource directions, eight images with different lighting source angles are used to increase the photometric information of the metal surface through multiple lighting resource devices. The 3D information of the metal surface is obtained through the improved eight-directional photometric stereo simplification model, highlighting the three-dimensional characteristics of the defects. To address the issues of image blurring and low contrast of faint defects in depth images, the angle sensitivity of height features of faint defects is analyzed. The depth-related 3D information component maps with high correlation are extracted and fused by using the fusion coefficients to generate an enhanced image, thereby improving the contrast of faint defects. Experimental results show that the proposed method increases the detection accuracy by 19.8% and the recall rate by 18.9% in the detection of actual metal surface defects, effectively achieving the low contrast issue in the detection of faint defects in metal surface images.

**Keywords:** metal surface; machine vision; photometric stereo vision; image fusion; image enhancement

## 0 引言

随着《中国制造 2025》战略方针的不断推进, 金属制造业面对着诸多表面缺陷检测、质量监控等问题。金属产品在生产过程中, 由于受制造工艺水平不一、设备工作参数不确定和生产条件优劣等因素影响, 易造成低对比度、纹理信息少的缺陷, 进而导致后续检测环节难以检出此类微弱缺陷, 对产品的外观和性能造成不良影响。因此, 增强金属表面微弱缺陷的研究, 有助于应用于后续缺陷检测任务。

金属表面缺陷在传统二维灰度图像中, 往往伴随着对

比度较弱<sup>[1]</sup>、边缘细节不明显、易受噪声影响、纹理信息缺失无法与背景做出区分等现象。为了增强图像对比度, 提高检测精度, 彭宁等人<sup>[2]</sup>将中值滤波、改进的小波阈值去噪技术、DeBlurGANv2 去模糊方法和基于 UACE 算法增强技术结合起来, 实现了图像降噪, 并且有效提升了图像的对对比度。汤勃等人<sup>[3]</sup>首先利用小波变换对图像进行分解, 然后对小波低频系数进行同态滤波和对高频系数进行高通滤波, 最后将滤波结果结合重构得到增强图像。陈从平等人<sup>[4]</sup>基于零参考深度曲线网络, 通过建立输入图像、照明平滑损失函数、颜色不变损失函数的联系, 实现对低

收稿日期: 2024-01-26; 修回日期: 2024-02-27。

基金项目: 国家自然科学基金项目(62072416); 国家自然科学基金项目(61873246)。

作者简介: 邵天成(1996-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 吴静静(1982-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师。

引用格式: 邵天成, 吴静静. 基于多视图融合的微弱缺陷检测增强方法[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(8): 86-92.

照度、细节缺失的缺陷图像对比度的提升。罗晖等人<sup>[5]</sup>利用 Gabor 滤波来克服图像采集过程中的外部因素影响, 并通过应用 HSV 空间变换算法来增强缺陷图中的关键特征信息。上述方法在缺陷图像增强效果方面有一定的提升, 但浅划伤、浅凹陷这类仅高度变化的缺陷在二维图像中仍存在细节模糊, 与背景无纹理差别等问题。

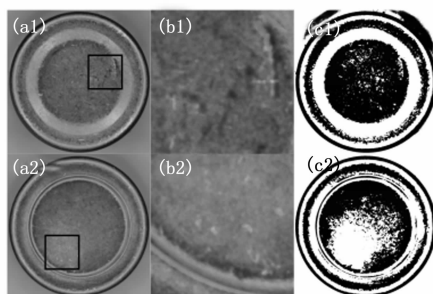
近年来, 结合深度信息的图像处理方法在缺陷检测任务中取得较好的效果, 学者们利用各类三维特征信息, 对于金属表面对比度低下、图像模糊的微弱缺陷增强和检测的探索也有较大的推进。肖天行<sup>[6]</sup>针对易拉罐二维图像中罐身缺陷特征微弱、背景噪声高、缺陷类别间易混淆的问题, 提出一种将罐身二维图像和三维点云的投影深度图进行配准并像素融合实现缺陷增强的方法。Zong 等人<sup>[7]</sup>将目标彩色图像与三维物体点云建立点-像映射关系, 采用图像分割和点云分割算法计算缺陷的三维参数, 降低背景纹理干扰, 增强缺陷特征。获取目标对象三维模型对于机器视觉和图像处理应用至关重要, 目前主要分为主动方法和被动方法<sup>[8]</sup>, 其中主动方法通过激光相机、结构光等设备主动发光, 但价格昂贵。被动方法常用的是多目立体视觉和光度立体法<sup>[9]</sup>, 光度立体法因其适合捕捉微小表面细节、成本较低等优点在检测任务中得到广泛的应用研究。罗立浩等人<sup>[10]</sup>通过使用四张不同方位光照图获取转向器的反照率图, 经高斯处理和极坐标转换来提取目标区域的缺陷特征。朱勇建等人<sup>[11]</sup>利用光度立体和级数展开法抑制非朗伯表面重建曲面变形问题, 对点云数据进行形态学处理实现缺陷检测。因此相较于传统二维图像增强方式主要处理图像亮度、噪声等属性的局限性, 利用金属表面的三维特征信息可以更有效地区分微弱缺陷与背景纹理的差异, 并提高微弱缺陷的突显度, 从而提高缺陷检测的准确性和可靠性。

针对电池金属表面浅划伤、浅凹陷等微弱缺陷传统二维图像难以检测的问题, 本文提出一种基于多通道图像融合的微弱缺陷增强方法, 首先通过八张不同方向光照图像估计电池表面三维信息, 其次将各三维特征图拆分提取对比度高的分量图, 最后对抽取的分量图由融合系数融合得到增强图像, 从而凸显微弱缺陷的高度特征。

## 1 检测方法

本文研究的电池表面均匀光照图像如图 1 (a) 所示, 电池在生产过程中易因磕碰、摩擦和力挤压等导致表面产生划痕、凹陷等缺陷, 部分如浅划伤、浅凹陷等缺陷存在目标微弱、对比度低和在图像中面积占比较低的特点, 这类缺陷受到图像背景、噪声干扰的影响, 在后续检测任务中容易导致严重过、漏检情况。如图 1 (b) 所示, 划伤缺陷容易和电池表面脏污连结, 且划伤缺陷的灰度值与脏污灰度值接近; 微弱凹陷缺陷与背景只有高度上的差异, 在传统二维图像上没有纹理差别。图 1 (c) 显示采用天津阔值法已无法较好区分缺陷目标和背景, 缺陷检测结果差。

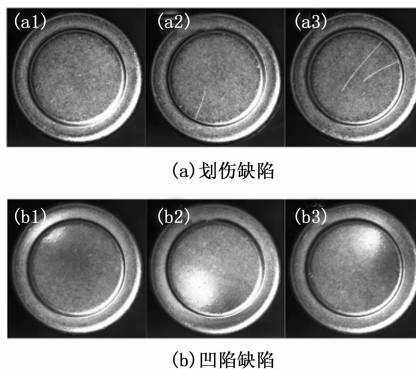
相较于传统单一光源的图像处理方法, 光度立体法利用多个光源方向的图像, 捕捉物体表面的光照变化, 从而获取更丰富的表面三维信息, 这使得在后续检测过程中能够更好地揭示缺陷的高度特征。



(a) 均匀光照图 (b) 缺陷细节 (c) 大津法处理

图 1 电池表面图像及图像处理结果

传统光度立体法对光照变化非常敏感, 由于光照条件、阴影等因素的影响, 在相同光源采集条件下, 同一缺陷随其角度变化, 其获取的光度信息可能会发生较大变化, 从而使三维信息估计不准确, 最终导致缺陷检测性能不佳。图 2 为相同缺陷随角度变化在同一光源方向下的采集结果, 微弱划痕、凹凸等缺陷失去了部分三维信息。



(a) 划伤缺陷

(b) 凹陷缺陷

图 2 同一缺陷随角度变化在同一光源下采集结果

为了解决上述问题, 本文提出的基于多通道图像融合的微弱缺陷增强方法流程如图 3 所示。对于目标检测对象, 首先使用提出的多方向光源装置采集八张不同光源角度下的图像, 通过光度立体简化模型获取目标对象的三维特征信息, 如法向量、反射率、深度值等; 然后对灰度深度图进行图像差分、背景掩膜并转换为伪彩色深度图; 其次将三维信息图像拆分成各通道分量图, 分析选择深度相关性高的单通道分量图; 最后, 求解图像融合系数, 将选出的分量图融合得到最终增强。本文方法增加了电池金属表面的光度信息, 有效获取了表面三维特征信息, 突显了图像中缺陷特征, 提高了后续缺陷检测的准确性。

## 2 微弱缺陷增强

### 2.1 基于改进光度立体法的金属表面三维信息重建

光度立体视觉是一种利用多个光源方向来估计表面几

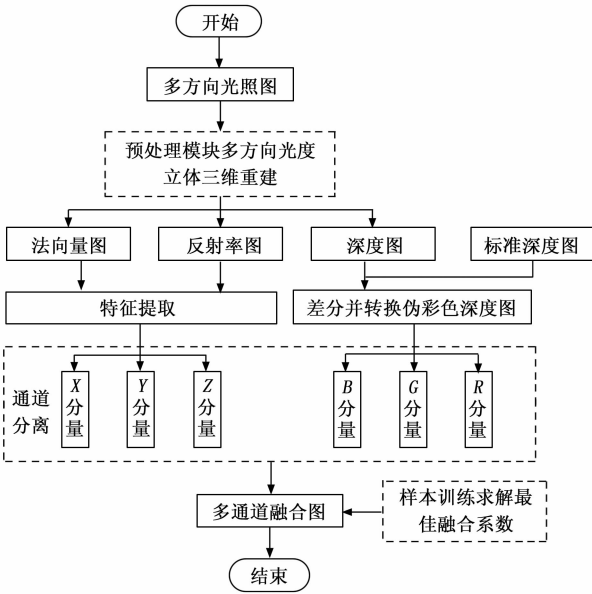


图 3 微弱缺陷增强算法流程

何形状的方法，能够从二维纹理信息中提取出三维特征。通过对至少 3 个不同角度下的光照图像进行形貌恢复，可以得到包括表面法向量、反射率、曲率和深度等多种表示方法。本文构建了如图 4 所示的八方向采集系统结构，相机、镜头组合垂直安装于基准平台正上方，环形分区光源<sup>[12]</sup>固定在相机装置与基准平台之间，其中环形光源各分区位于同一平面的 0、45、90、…、315°共 8 个方位，各分区光源强度相同且分区光源中心与基准平台中心等距。 $L_1$ 、 $L_2$ 、…、 $L_8$  分别是 8 个光源的方向向量， $N$  为物体表面法向量。通过该系统能够采集目标物体在八方向光源下的图像，电池表面采集图像如图 5 所示。

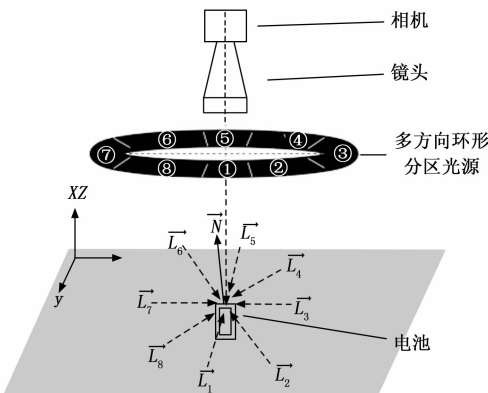


图 4 8 方向采集系统结构图

在朗伯理想漫反射模型中，入射光和反射光满足双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 模型<sup>[13]</sup>，相机系统采集目标物体的图像亮度与光源、物体表面法向量的关系可由公式 (1) 表示：

$$I = E\rho L N \quad (1)$$

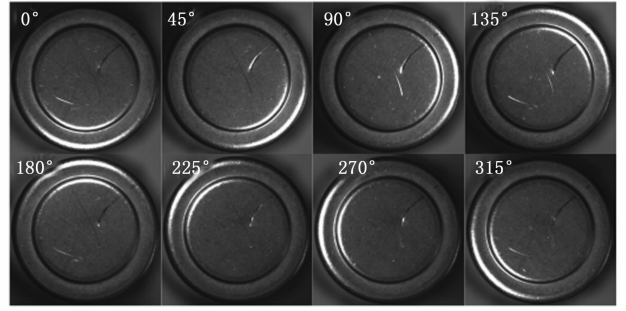


图 5 电池表面多方向光源采集图

式中， $I$  为电池表面上一点  $(x, y, z)$  经漫反射射入图像传感器的光亮度，即图像灰度值； $E$  为光源照射在该点的光强； $\rho$  为电池表面该点的表面反射率； $L = (L_x, L_y, L_z)$  为光源方向向量； $N = (N_x, N_y, N_z)$  为电池表面该点处的法向量；对于电池表面上某像素点在对应的多角度光照图像中的亮度值  $I$ ，可建立如下线性方程组：

$$I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \end{bmatrix} = E\rho \begin{bmatrix} L_{x1} & L_{y1} & L_{z1} \\ L_{x2} & L_{y2} & L_{z2} \\ L_{x3} & L_{y3} & L_{z3} \\ L_{x4} & L_{y4} & L_{z4} \\ L_{x5} & L_{y5} & L_{z5} \\ L_{x6} & L_{y6} & L_{z6} \\ L_{x7} & L_{y7} & L_{z7} \\ L_{x8} & L_{y8} & L_{z8} \end{bmatrix} (N_x, N_y, N_z)^T \quad (2)$$

将  $L$  由光源方向的俯仰角、方位角形式表示， $N$  由求解分量表示，可以得到简化后的光度立体视觉法的光照表达式  $I$  为：

$$s = [\cos\varphi\sin\theta, \sin\varphi\sin\theta, \cos\theta] \quad (3)$$

$$n = \begin{bmatrix} \frac{-p}{\sqrt{p^2 + q^2 + (1)^2}} \\ \frac{-q}{\sqrt{p^2 + q^2 + (1)^2}} \\ \frac{1}{\sqrt{p^2 + q^2 + (1)^2}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$I = \rho\cos(\tau) = \rho \frac{-p\cos\varphi\sin\theta - q\sin\varphi\sin\theta + \cos\theta}{\sqrt{p^2 + q^2 + (1)^2}} \quad (5)$$

式中， $\tau$  为单位光源方向向量和单位法向量的夹角， $s$  为单位光源方向向量， $\theta$  为光源方向的俯仰角， $\varphi$  为光源方向的方位角， $n$  为单位法向量， $p$ 、 $q$  为求解单位法向量过程中的分量；将八分区光源各方位角 0、45、90、…、315°代入公式 (3)，通过分区光源位置关系进行加减消元得：

$$I_{\text{sum}} = I_0 + I_{90} + \dots + I_{315} \quad (6)$$

$$\begin{cases} Ip = \frac{(I_0 - I_{180}) + (I_{45} - I_{225})}{2I_{\text{sum}}} \\ Iq = \frac{(I_{90} - I_{270}) + (I_{135} - I_{315})}{2I_{\text{sum}}} \end{cases} \quad (7)$$

式中，左侧  $I_p$  和  $I_q$  通过 8 幅方向光源采集图像对应位置的像素灰度值计算得到，右侧化简后为只有  $p$ 、 $q$  未知量的光

照表达式, 即可求解出单位法向量。最后每个像素点对应的反射率可由公式 (8) 计算得到, 对应的高度  $z$  可由法向量沿  $x$ 、 $y$  方向的分量积分得到<sup>[14]</sup>。

$$\rho = |n| \quad (8)$$

通过对计算得出的法向量、反射率、高度值进行归一化并将其作为灰度值代入图像中, 可以得到包含三维信息的法向量图、反射率图、深度图。通过对八张方向光源采集图像进行系数加权融合, 可以得到二维均匀光照图像。如图 6 所示, 与均匀光照原图 6 (a) 相比, 可以观察到三维重建结果图 6 (b) 和图 6 (c) 能够突出方向敏感类缺陷, 并在一定程度上增强微弱缺陷的对比度。

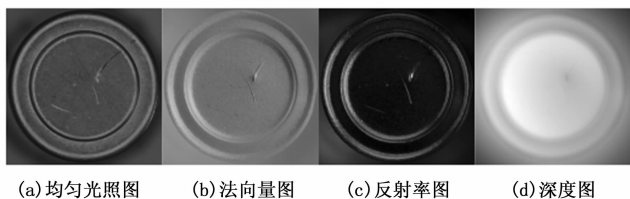


图 6 三维重建结果

## 2.2 微弱缺陷融合增强

在电池表面均匀光照原图中, 浅划伤和浅凹陷的对比度低, 缺陷边缘的灰度变化小, 缺乏细节纹理信息, 同时无法准确体现出高度差异特征, 这些问题会给后续的缺陷检测带来困难。相比之下, 通过光度立体三维重建得到的法向量图、反射率图和深度图能够从不同三维信息角度突显表面缺陷与背景在各自特征上的差异, 从而能够有效解决脏污等因素对检测结果的影响。但对于一些微弱的缺陷, 如图 7 所示的浅划伤和浅凹陷, 由于其与表面高度差异小, 基本在同一平面上, 深度图像中的灰度级在高亮度范围内集中, 导致深度图像变得模糊。

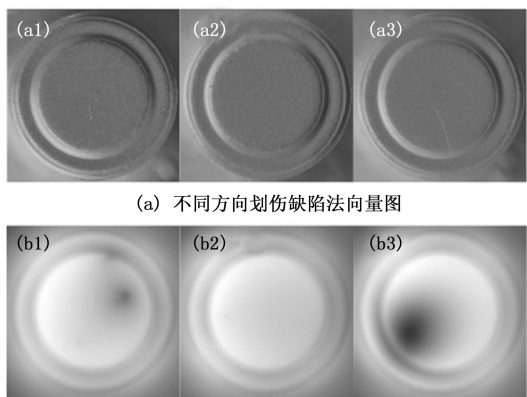


图 7 缺陷图像

为了增强微弱缺陷的特征, 根据光度立体重建获得的三维信息, 分析了图像及各分量图中微弱缺陷特征的对比度, 结合张微微<sup>[15]</sup>提出的图像融合策略, 针对电池表面微弱缺陷提出了一种基于多通道图像融合增强算法。通过掩模抑制背景干扰、深度图像差分和多通道图像融合等方法

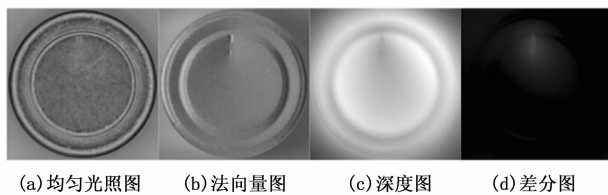
增强图像中动态范围小、对比度低的微弱缺陷部分。

具体步骤如下:

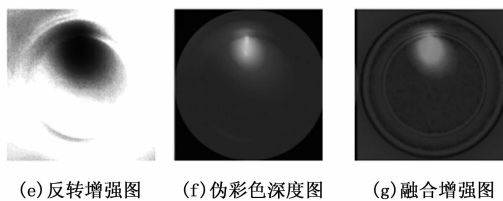
1) 将三维重建得到的深度图与标准工件的深度图进行相减, 得到差分图像如图 8 (d) 所示。

2) 将差分图像进行反转, 以突出微弱凹陷缺陷的高度差。然后使用双边滤波来抑制图像噪声, 并更好地提取凹陷缺陷的边缘特征, 得到增强后的图像如图 8 (e) 所示。

3) 对图 8 (e) 进行伪彩色转换, 以得到伪彩色深度图。为了减少电池周围背景对后续增强算法的影响, 首先在端面图像中精确定位电池的最小外接方形区域, 然后设置端面最大内接圆并将周围的图像背景掩膜去除, 得到如图 8 (f) 所示的结果。



(a) 均匀光照图 (b) 法向量图 (c) 深度图 (d) 差分图



(e) 反转增强图 (f) 伪彩色深度图 (g) 融合增强图

图 8 增强过程图

4) 将深度相关性较高的单通道分量图融合为缺陷增强图像如图 8 (g) 所示。首先将法向量图 9 (a) 和伪彩色深度图 9 (c) 分别进行通道分离得到对应方向的分量图 9 (d) 至图 9 (i), 每个分量图代表了曲面上某一点处不同方向的弯曲程度。其次分析微弱缺陷在不同分量图上的对比度, 观察到反射率图 7 (a) 的微弱缺陷对比度较高, 而法向量在  $X$  方向的  $B$  通道图 10 (d) 的对比度较低; 法向量在  $Z$  方向的  $R$  通道图 7 (f) 的微弱缺陷对比度较高, 而伪彩色图的  $R$  通道图 9 (i) 的对比度较低。最后通过公式 (9) 对各通道图进行加权融合, 将各通道值合成为新的增强色彩图。

$$\begin{cases} B_{\text{fusionimg}} = B_{\text{reflectimg}} \times \alpha \\ G_{\text{fusionimg}} = G_{\text{colordeplmg}} \times \beta \\ R_{\text{fusionimg}} = R_{\text{normalimg}} \times \gamma \end{cases} \quad (9)$$

不同角度划伤缺陷样本经本节增强方法后的结果如图 10 (a) 所示, 不同强度凹陷缺陷样本经本节增强方法后的结果如图 10 (b) 所示。经过增强处理的图像能够突出浅划伤和浅凹陷缺陷的特征, 有利于后续的缺陷检测任务应用。

## 2.3 融合系数求解

为了达到最佳的融合效果, 需要自适应计算最优的融合系数。首先规定融合系数满足条件  $\alpha + \beta + \gamma = 1$  且迭代步长为 0.05, 融合系数组合曲线如图 11 所示。其次针对不同

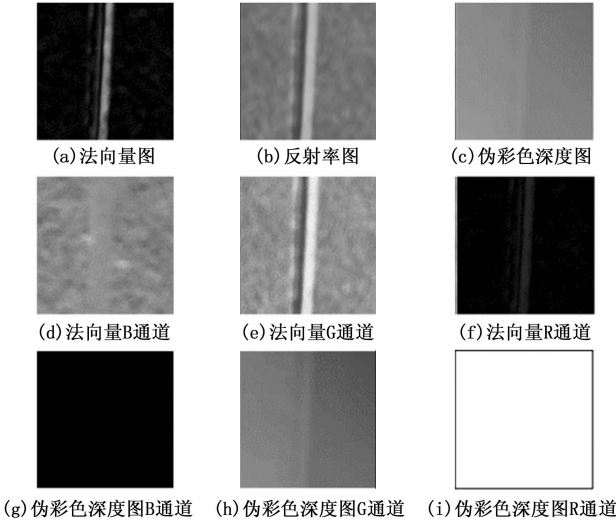


图 9 增强流程效果图

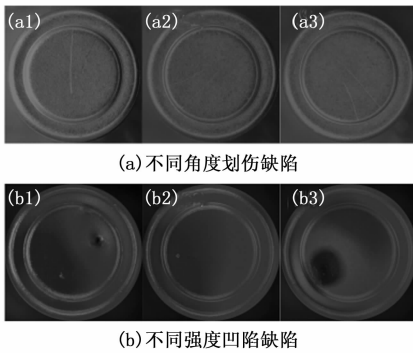


图 10 融合增强结果

类型和强度的缺陷样本，分别利用上节多通道图像融合算法，使用不同的系数组合进行图像融合。最后对于一批电池图像，在每一组融合系数下对其融合图像进行计算，求得所有融合图像对比度<sup>[16]</sup>均值最大且结构相似性 (SSIM, structural similarity)<sup>[17]</sup>均值高于设定阈值时的融合系数组合。

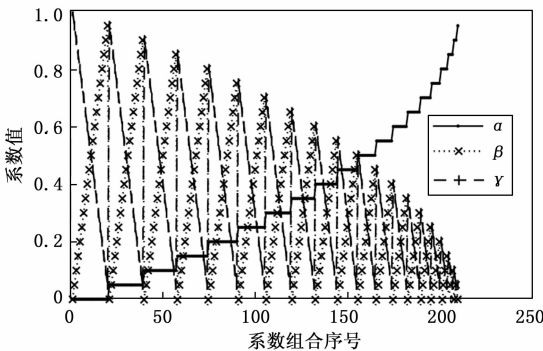


图 11 融合系数组合图

为了对融合后的图像质量进行量化分析和辅助评判，使用了两个指标来衡量图像的质量：图像对比度和结构相

似性。图像对比度是衡量图像中物体边缘和细节的清晰度，使用图像对比度指标可以帮助评估图像的细节程度。结构相似性是基于人眼对图像结构信息的感知假设而提出的指标。它能够比较两个图像之间的结构相似度，从而衡量它们的相似程度。结构相似性指标的取值范围在  $[0, 1]$  之间，数值越大表示两个图像之间的差异越小，即它们的相似度越高。相关计算公式如下：

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^{\alpha} \cdot [c(x, y)]^{\omega} \cdot [s(x, y)]^{\beta} \quad (10)$$

式中， $l(x, y)$  为亮度相似性， $c(x, y)$  为对比度相似性， $s(x, y)$  为结构相似性。

### 3 实验结果和分析

#### 3.1 检测系统搭建

为验证本文微弱缺陷检测增强方法的有效性和准确性，根据金属表面三维信息重建原理选择实验硬件设备，搭建电池端面缺陷检测测试环境。实验所用的图像通过 Basler-acA2440-20 gm 500 w 灰度相机和 Canrill XF-5MDT024X150 远心镜头组合采集获取，分区光源采用 Rsee P-RLF8-140 八分区环形光源，控制器选用 Rsee PM-D-24W200 八分区光源控制器。

实验在 12th Gen Intel (R) Core (TM) i7-12700KF 3.6 GHz 处理器，32.0 GB 内存，NVIDIA GeForce RTX3060 显卡，Windows 10 家庭中文版操作系统的主机上进行。实验图像采集系统采用 C++ 编程实现，开发软件采用 Visual Studio 2019 版本，使用了 OpenCV、Qt、Eigen 等外部库函数。训练及测试网络选用 YOLOv5s 模型，训练及测试程序在 Pycharm 集成开发环境，Pytorch1.10.1 框架下实现，训练参数 Epoch 设置为 300，学习率设置为 0.000 1，Batch-Size 设置为 4。

#### 3.2 实验数据集获取

为获取电池端面图像均匀光照图数据集、法向量图数据集、深度图数据集及融合图数据集，设计以下实验，抽取 150 节直径为 14 mm 的圆柱电池，首先通过采集装置采集电池端面均匀光照图和各方向光照图 500 组。其次按照本文增强算法流程通过改进八方向光度立体算法获取电池端面法向量图、反射率图及深度图。最后根据 2.3 节提出的融合系数求解算法计算出电池端面数据的最佳融合系数，以该融合系数根据 2.2 节步骤融合得到增强图像，部分微弱缺陷增强结果如图 12 所示，突出缺陷的三维特征信息，增强缺陷对比度以便进行后续缺陷检测。以上分别构成本实验的均匀光照图数据集、法向量数据集、深度图数据集、融合图数据集各 500 张，缺陷类型为划伤、凹陷两类，图像像素分辨率为  $980 \times 980$ 。

#### 3.3 客观平均方法评价

为了验证各俯角下采集的图像质量，并且减少主观评价可能存在的误差，本文采用了客观平均方法进行评价。选取了基于空域、信息学、统计学方法的特征指标，包括图像平均梯度、信息熵和方差，进行量化评价。图像平均

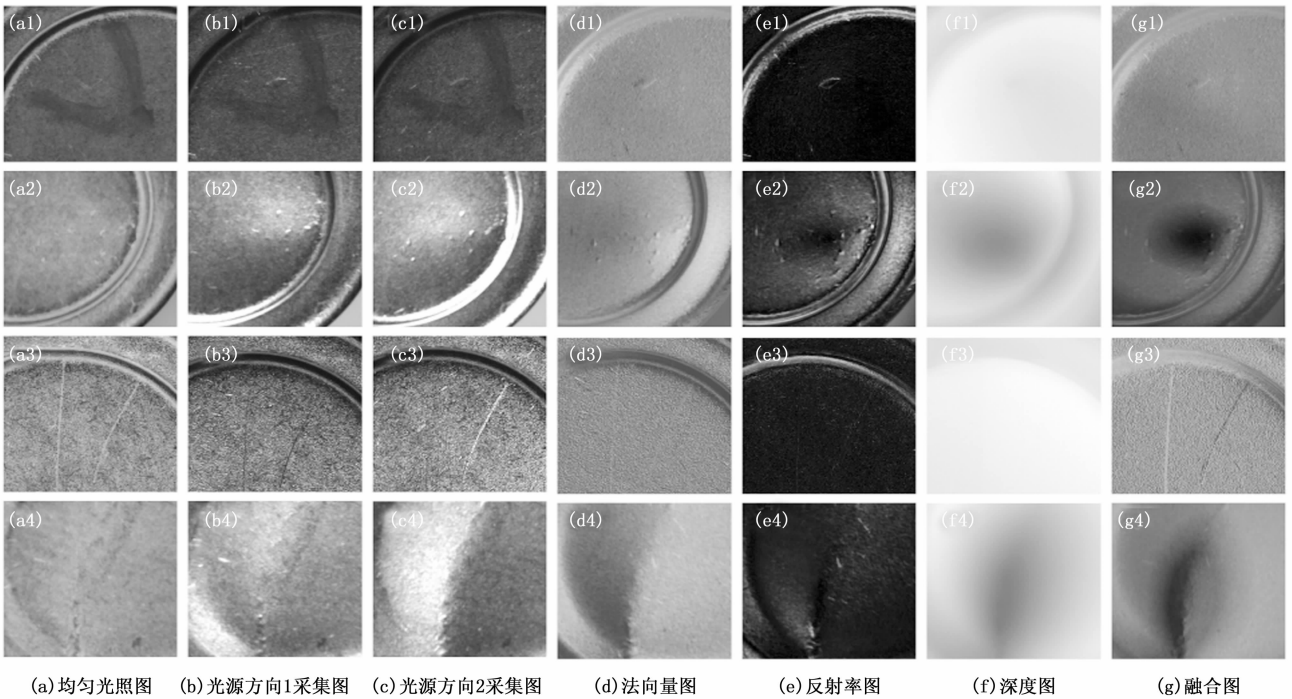


图 12 缺陷样本图

梯度可以通过计算相邻像素灰度特征值变化来评估<sup>[18]</sup>, 本文采用 Laplace 算子方法计算图像梯度信息, 反映出图像中边缘、纹理细节, 并评价图像模糊程度。在信息学中, 信息熵表示一种信息的混乱程度, 信息熵越大, 图像的像素分布不确定度越大, 图像的复杂度越高<sup>[19]</sup>。在统计学中, 计算图像与原均值图像之间的方差, 方差越大表明灰度分布范围更广<sup>[20]</sup>, 分散程度更大, 细节更多, 可以从侧面反映图像的对比度大小。相关计算公式如下:

$$G = \frac{\sum_x \sum_y [D(x, y)]^2}{M \times N} \quad (11)$$

$$H = - \sum_x \sum_y k(j) \ln[k(j)] \quad (12)$$

$$V = \frac{\sum_x \sum_y [I(x, y) - I_o]^2}{M \times N} \quad (13)$$

式中,  $G$  为图像平均梯度,  $D$  为图像一像素点与周围像素的高斯加权的差,  $M$  和  $N$  为图像的宽和高,  $H$  为图像信息熵,  $k(j)$  为像素级别  $j$  在图像中的出现频率,  $V$  为图像方差,  $I$  为图像像素,  $I_o$  为图像像素均值。

表 1 显示了对电池的法向量图、深度图和融合增强图进行上一小节 3 个指标计算的平均值结果。根据表中各项指标可以看出, 相对于深度图和法向量图, 经过本文算法增强后的融合图像的信息熵略低。与深度图相比, 融合图像的清晰度提高了 110.5%, 方差提高了 58.2%。与法向量图相比, 融合图像的清晰度提高了 10.4%, 方差提高了 24.6%。这些结果表明融合增强图能够满足对缺陷增强的需求。

表 1 不同图像各计算指标平均值

图像	清晰度	信息熵	方差
法向量图	$1.2413 \times 10^{-5}$	6.255 4	$7.1512 \times 10^{-4}$
深度图	$6.5116 \times 10^{-6}$	6.412 5	$5.6324 \times 10^{-4}$
融合图	$1.3704 \times 10^{-5}$	5.867 2	$8.9104 \times 10^{-4}$

### 3.4 本文增强算法检测性能实验

为进一步验证本文融合增强算法有助于后续缺陷检测任务, 将同一电池相应的均匀光照图、法向量图、深度图和本文方法融合图分别进行相同标注并训练, 训练及测试网络选用 YOLOv5s 模型。将各 500 张图像的均匀光照图数据集、法向量图数据集、深度图数据集、融合图数据集, 以 4:1 的比例, 分别划分训练数据集、测试数据集。本文主要选择精确率 (Precision)、召回率 (Recall) 作为评价指标<sup>[21]</sup>, 用于评价本文方法对于后续检测要求的性能提升效果, 相关计算公式如下:

$$P(a) = \frac{TP(a)}{TP(a) + FP(a)} \times 100\% \quad (14)$$

$$R(a) = \frac{TP(a)}{TP(a) + FN(a)} \times 100\% \quad (15)$$

其中:  $TP(a)$  为正确检测出的  $a$  类缺陷的样本数量,  $FP(a)$  为错误检测成  $a$  类缺陷的样本数量,  $FN(a)$  为没有被检测出的  $a$  类缺陷样本数量。

融合图测试集部分图像检测结果如图 13 所示, 各测试集测试得到的精确率、召回率如表 2 所示。实验结果表明, 通过本文的融合增强算法, 电池缺陷检测的精确率和召回率有 10~30% 的提升, 本文方法有助于金属缺陷检测任务。

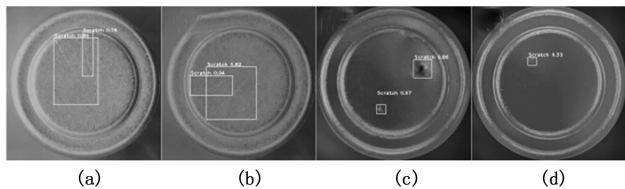


图 13 融合图的检测结果

表 2 各测试集检测结果比较 %

图像	P	R
均匀光照图	69.2	73.4
法向量图	83.6	80.5
深度图	65.2	59.4
融合图	89.0	92.3

#### 4 结束语

本文针对金属表面浅划伤、浅凹陷等微弱缺陷检出率低下的问题,以电池为研究对象,提出了一种基于多通道图像融合的微弱缺陷增强方法。首先,构建八方向光源采集装置获取电池表面在不同光源角度下的图像,弱化了传统光度立体法因对光源变化敏感而导致估计三维信息不准的问题。其次,通过改进的八方向光度立体简化模型计算得到电池表面三维特征信息,解决了电池缺陷在二维图像上对比度低、面积占比小、易受背景干扰等问题。最后,针对微弱缺陷在深度图像中存在的图像模糊、对比度低下等问题,通过分析微弱缺陷高度特征呈现角度敏感性特点,提出一种多通道图像融合增强方法,提高了微弱缺陷的突显度。实验结果证明,本文算法有效获取了金属表面三维信息,突出了图像中的微弱缺陷特征,提高了浅划伤、浅凹陷等微弱缺陷在后续检测任务中的检测准确性。但是,若融合增强算法未能正确获取包含焊接点、连接点和电极等复杂电池表面的三维特征信息时,增强效果会受到影响。因此如何优化光度立体模型,提高其计算复杂金属表面形貌的能力,如何利用高斯曲率图等特征信息图进行深度融合进一步提高微弱缺陷对比度,将作为之后的研究内容。

#### 参考文献:

- [1] 王慧菁, 杨长辉, 吕庆. 基于机器视觉的金属表面缺陷检测方法综述 [J]. 微纳电子与智能制造, 2022, 4 (4): 71-81.
- [2] 彭宁, 吴浩, 漆梓渊, 等. 一种电子换向器表面缺陷图像去噪和增强算法 [J]. 河北水利电力学院学报, 2023, 33 (3): 1-8.
- [3] 汤勃, 孔建益, 王兴东, 等. 钢板表面低对比度微小缺陷图像增强和分割 [J]. 中国图象图形学报, 2020, 25 (1): 81-91.
- [4] 陈从平, 张力, 江高勇, 等. 改进零参考深度曲线低照度图像增强算法 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (1): 209-214.
- [5] 罗晖, 徐广隆. 基于图像增强与深度学习的钢轨表面缺陷检测 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18 (3): 623-629.
- [6] 肖天行. 基于 2D/3D 信息融合的易拉罐外观缺陷识别方法研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2023.
- [7] ZONG Y, LIANG J, WANG H, et al. An intelligent and automated 3D surface defect detection system for quantitative 3D estimation and feature classification of material surface defects [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 144 (3): 106633-106648.
- [8] 丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54 (7): 27-41.
- [9] WOODHAM R J. Photometric method for determining surface orientation from multiple images [J]. Optical Engineering, 1992, 19 (1): 139-144.
- [10] 罗立浩, 许亮. 基于机器视觉的非平整物体表面凸起异物检测方法 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (5): 50-54.
- [11] 朱勇建, 罗坚, 秦运柏, 等. 基于光度立体和级数展开法的金属表面缺陷检测方法 [J]. 广西师范大学学报 (自然科学版), 2020, 38 (6): 21-31.
- [12] FAN H, RAO Y, RIGALL E, et al. Near-field photometric stereo using a ring-light imaging device [J]. Signal Processing Image Communication: A Publication of the the European Association for Signal Processing, 2022, 102 (10): 116605-116614.
- [13] HERTZMANN, SEITZ M. Example-based photometric stereo: shape reconstruction with general, varying BRDFs [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27 (8): 1254-1264.
- [14] 徐科, 甘伟, 焦建朋, 等. 基于光度立体的钢轨表面三维重建方法 [J]. 河北冶金, 2021, 305 (5): 18-22.
- [15] 张微微, 祝开艳. 基于图像融合的低光照水下图像增强 [J]. 计算技术与自动化, 2023, 42 (4): 85-92.
- [16] 牛宏侠, 王春智. 基于 HSI 空间的沙尘图像增强算法 [J]. 北京交通大学学报, 2022, 46 (5): 1-8.
- [17] ZHOU W, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13 (4): 600-612.
- [18] 陈健, 李诗云, 林丽, 等. 模糊失真图像无参考质量评价综述 [J]. 自动化学报, 2022, 48 (3): 689-711.
- [19] 陈清江, 顾媛. 基于多尺度深度可分离卷积的低照度图像增强算法 [J]. 计算机工程与科学, 2023, 45 (10): 1830-1837.
- [20] HSU C C, LIN C W, FANG Y, et al. Objective quality assessment for image retargeting based on perceptual geometric distortion and information loss [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8 (3): 377-389.
- [21] OKSUZ K, CAM B C, KALKAN S, et al. One metric to measure them all: localisation recall precision (LRP) for evaluating visual detection tasks [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2022, 44 (12): 9446-9463.