

# 基于机器视觉的金属包装表面损伤检测改进方法

马俊杰, 陶冠霖, 潘大宝, 杨继新, 吕庆佳, 王 鹏, 刘 阳\*

大连工业大学机械工程与自动化学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2026年4月15日; 录用日期: 2026年5月21日; 发布日期: 2026年5月29日

## 摘 要

金属印刷包装盒作为用于储存食品、药品等物品的容器, 其表面质量需要受到严格控制, 以满足相关质量要求。由于人工检测存在效率低、主观性强和稳定性不足等问题, 因此有必要开发自动化检测系统。本文提出了一种非接触式高精度表面缺陷检测方法, 用于检测和识别金属印刷包装盒表面缺陷。针对图像处理过程中容易产生影响缺陷识别的图像伪影问题, 本文引入超分辨率重建技术, 以提高图像获取与处理质量。同时, 采用曲线拟合方法对测试图像中的感兴趣区域进行特征提取。最终, 实现了图像缺陷特征的提取与识别。实验结果表明, 该方法能够在有限相机分辨率条件下显著提高图像配准精度, 并可检测宽度细至0.08 mm的划痕缺陷, 能够满足印刷厂实际生产中的检测需求。

## 关键词

图像采集, 超分辨率重建, 亚像素配准, 特征识别

# An Improved Damage Detection Method for Metal Packaging Surfaces Based on Machine Vision

Junjie Ma, Guanlin Tao, Dabao Pan, Jixin Yang, Qingjia Lv, Peng Wang, Yang Liu\*

School of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian Liaoning

Received: April 15, 2026; accepted: May 21, 2026; published: May 29, 2026

## Abstract

Metal printed packaging box, a container known to store food, medicine and other items, should be

\*通讯作者。

文章引用: 马俊杰, 陶冠霖, 潘大宝, 杨继新, 吕庆佳, 王鹏, 刘阳. 基于机器视觉的金属包装表面损伤检测改进方法[J]. 人工智能与机器人研究, 2026, 15(3): 953-967. DOI: 10.12677/airr.2026.153087

controlled to meet the requirements of surface quality. Due to the problems of manual detection, it is necessary to develop an automated detection system. In this paper, a non-contact high-precision surface defect detection method for detecting and identifying surface defects of metal printing packaging boxes is developed. In this regard, since image artifacts often occur in the image processing process that affect the identification of defects, some innovative actions have been taken, super-resolution reconstruction techniques, to determine the method of obtaining appropriate images. Also, feature extraction is conducted on the region of interest in the test image, utilizing curve fitting. Ultimately, image defect features are extracted and subsequently identified. Experimental results demonstrate that this method markedly enhances image registration accuracy under limited camera resolution, capable of detecting scratches as fine as 0.08 mm. This method adequately fulfills the practical detection needs of printing plants.

## Keywords

Image Acquisition, Super-Resolution Reconstruction, Sub-Pixel Registration, Feature Recognition

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

金属包装盒以其坚固的材料强度和优越的密封性能而著称，被广泛用于各种物品的储存和运输。随着消费者标准的提高，金属包装盒的外观越来越受到制造商的关注。这些包装盒的外观质量主要受所用材料和印刷工艺的影响。因此，对于企业而言，了解金属包装盒的外观质量至关重要，采用先进的技术进行缺陷检测势在必行。

金属包装盒的表面缺陷可分为两类。如图 1 所示，一类包括印刷过程中产生的缺陷，如局部斑点和油墨飞溅。另一类包括运输过程中发生的缺陷，如金属表面的划痕和磨损。目前金属包装盒的图像检测方法主要包括人工目视检测、基于深度学习的检测方法和基于机器视觉的检测方法。传统的检测方法依靠人工目视检查来识别表面缺陷，但 these 方法被认为是不可靠且低效的。对人工的过度依赖增加了企业的管理成本，且检测的准确性极易受到工人经验和状态的影响，他们往往缺乏统一的检测标准。

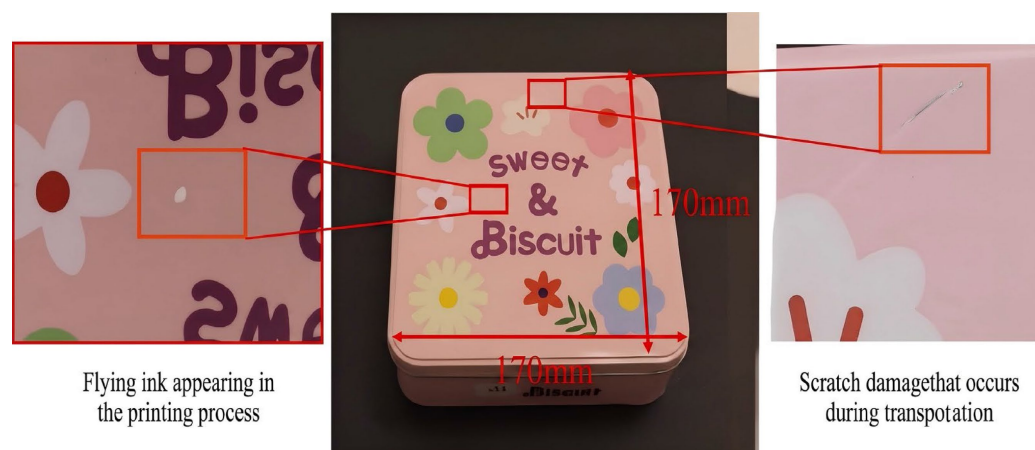


Figure 1. Common defects in metal packaging boxes

图 1. 金属包装盒中常见的缺陷

近年来, 基于深度学习的图像处理技术发展迅速, 为表面缺陷检测提供了新的解决方案, 特别是卷积神经网络(CNN)和残差神经网络(ResNet), 它们在表面缺陷检测中显示出强大的分类和识别能力。Yu 等[1]提出了一种基于全卷积网络(FCN)的表面缺陷检测方法, 用于工业环境中的自动化缺陷检测。该方法能够在输入图像上进行像素级的缺陷分割, 避免了传统方法中复杂的特征工程步骤。Konovalenko 等[2]提出了一种基于集成深度残差神经网络(ResNet)的钢材表面缺陷检测方法。通过结合多个 ResNet 模型的预测结果, 显著提高了检测的准确性和鲁棒性。Liu 等[3]提出了一种改进的 YOLOv4 算法, 通过采用新的 SoftPool SPP 结构和对比度受限自适应直方图均衡化预处理, 显著提高了织物缺陷检测的准确性和抗干扰能力此外, 其他[4]-[7]分别针对复杂工业场景中的非表面缺陷检测提出了创新方法。通过将先进的传感技术与深度学习算法相融合, 这些方法显著提高了增材制造、焊接、电子制造和包装领域中隐藏缺陷检测的准确性、自动化水平和实时性能, 并为工业质量控制提供了多样化的解决方案。综上所述, 虽然基于深度学习的方法表现出了更强的鲁棒性和卓越的准确性, 但它们在需要大量缺陷样本数据以及满足实时处理需求方面, 仍面临着挑战。

图像处理和机器视觉技术是表面缺陷检测领域的传统研究方向, 其核心在于通过滤波、边缘检测、形态学分析等方法提取缺陷特征。相关研究从 20 世纪 80 年代一直持续至今, 涵盖了广泛的工业场景。1983 年, Suresh 等[8]引入了一种钢板表面缺陷检测系统, 这是机器视觉技术在工业生产中最早的应用之一。对于表面缺陷检测, Gupta 等[9]研究了图像噪声问题, 优化了滤波和边缘检测方法, 并分析了表面光洁度对像素强度分布的影响; Lee 等[10]提出了一种基于 GPU 加速的线性划痕检测算法, 显著提高了计算效率。Kebin 等人[11]提出了一种基于多特征加权融合的划痕检测方法, 将多源特征融合与改进的区域生长算法相结合, 实现了高精度的划痕检测; Ding 等[12]设计了一种基于机器视觉技术的树脂眼镜分散缺陷自动检测方法, 通过设计的光学成像系统和图像处理显著增强了缺陷区域的灰度梯度差异。在焊接和增材制造领域, Mar 等[13]使用 Log-Gabor 滤波器实现了焊接接头缺陷的高效分类, 该滤波器同时对耐腐蚀性偏差具有鲁棒性。Barua 等[14]对激光金属沉积中的缺陷视觉检测进行了深入研究。利用温度梯度的不规则特征建立缺陷检测模型, 提出了一种新的缺陷检测方法。面对复杂结构和特殊场景, He 等[15]提出了一种基于 RSPC-PR 算法的通电晶格缺陷检测方法, 准确率达到了 97.5%。Colvalkar 等[16]开发了一种管道检测机器人, 结合图像处理技术识别内部异常, 拓展了机器视觉在隐藏缺陷检测中的应用边界。在频域分析方向, Liu 等[17]利用傅里叶变换检测织物缺陷, 他们将图像转换到频域进行滤波, 然后通过傅里叶逆变换重建图像, 在多个数据集中实现了超过 90% 的检测精度。

综上所述, 上述方法未能同时满足对检测精度、效率和相机分辨率的要求。为解决这一问题, 本文引入了一种基于超分辨率重建技术的非接触式高精度表面缺陷检测方法, 该方法使得利用低分辨率相机进行快速准确地检测成为可能。为了增强对各种缺陷的特征识别, 提高检测精度, 缩短检测时间, 并最大程度地减少对超高分辨率相机的依赖, 本文引入了一种用于金属印刷包装盒的表面缺陷检测方法。如图 2 所示为金属包装盒表面损伤检测改进方法总体流程图, 该方法在图像采集过程中结合了图像高光抑制和特征增强, 有效抑制了金属包装盒上的局部高光反射, 为后续的精确定位配准奠定了基础。一种利用图像超分辨率重建的亚像素配准方法, 解决了由相机分辨率限制引起的图像配准精度低的问题。一种图像差分缺陷提取方法, 解决了金属包装盒表面质量检测过程中图像特征配准误差大的问题。基于图像形态学的缺陷提取则成功地对各种类型的缺陷进行了分类和识别。

## 2. 金属包装盒图像采集方法

由于金属包装盒表面微观纹理划痕以及印刷区域局部高光的影响, 获取的图像往往无法清晰、准确地反映金属包装盒表面的所有特征信息。如图 3 所示, 同一包装盒上不同方向的划痕图像清晰度差异很

大。针对上述问题，首先，通过分析包装盒金属材料及表面不同印刷区域的光谱反射特性，利用 GaiaStortorter-dual 全光谱高光谱分选系统初步确定了光源的光谱波段范围。其次，探讨了金属零件划痕方向对图像采集质量的影响，并研究了相机 CCD 芯片的感光特性。

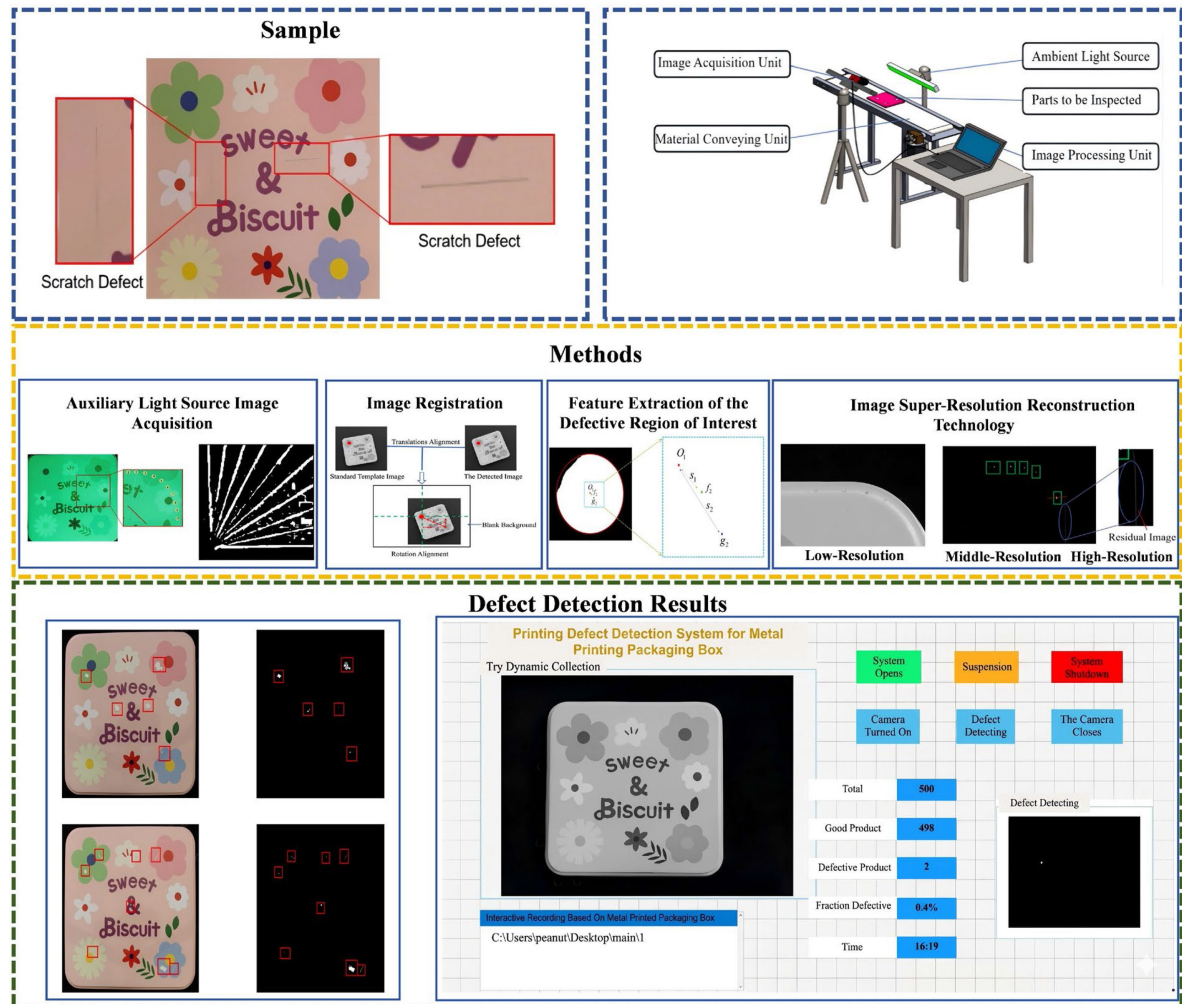
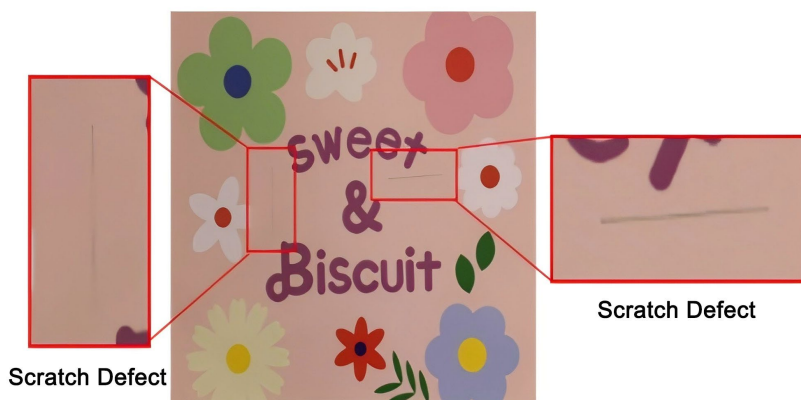


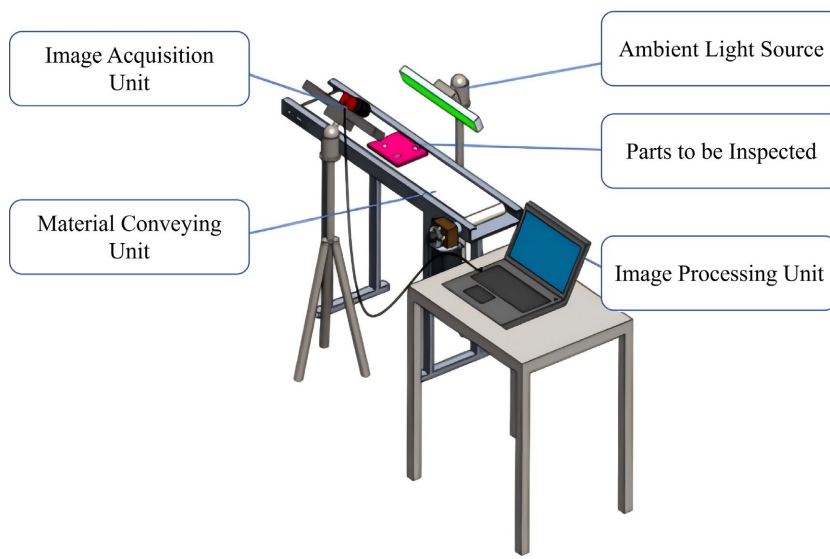
Figure 2. Overall workflow of the improved surface damage detection method for metal packaging boxes  
图 2. 金属包装盒表面损伤检测改进方法总体流程图

光源的准确光谱波段范围已确定为 500~600 nm。通过 G-D HSI 分选系统分析可知，滤光片对图像采集系统的环境光具有良好的截止效果，能够达到减少环境光干扰的目的。最后，通过实验确定光源与被测物体表面成 40°角，光源与金属包装盒表面的距离为 300 mm。根据实验设计方案，图像采集系统及光源模型结构示意图如图 4 所示。

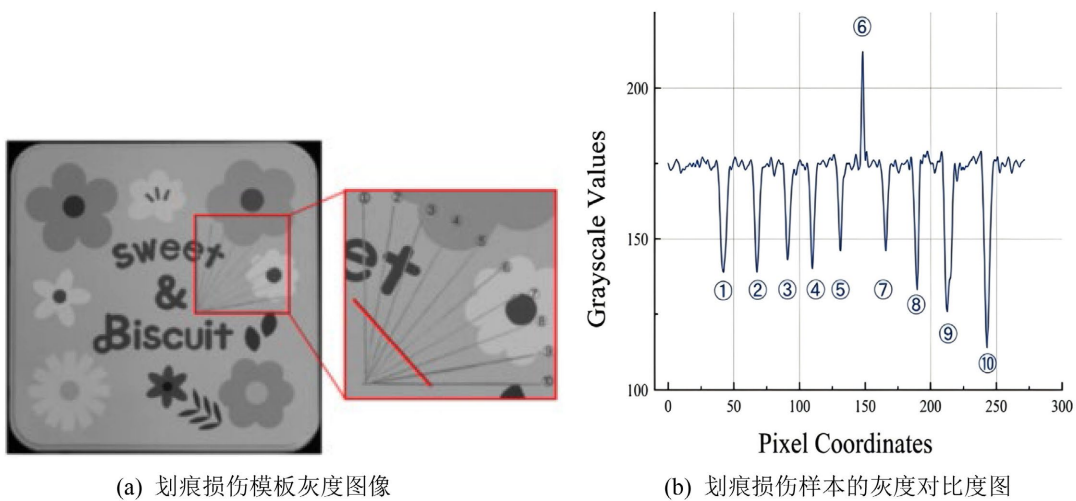
本研究探讨了采集系统辅助光源模型对图像质量的影响，如图 5(a)、图 5(d)所示。在同一金属包装盒表面人为刻画了 0°~90°、间隔 10°的划痕损伤，以探索所提出的辅助照明模型是否能充分反映图像的特征信息。如图 5(b)、图 5(c)所示，在常规光源模型照射的 10 条划痕中，仅有一条实现了划痕损伤特征的信息增强。从图 5(e)、图 5(f)可以看出，使用辅助光源模型时，金属包装盒表面的划痕损伤特征得到显著增强，成功满足了图像采集系统检测划痕损伤特征的需求。



**Figure 3.** Compared with vertical scratches, horizontal scratches are significantly clearer  
**图 3.** 与垂直划痕相比，水平划痕明显更清晰

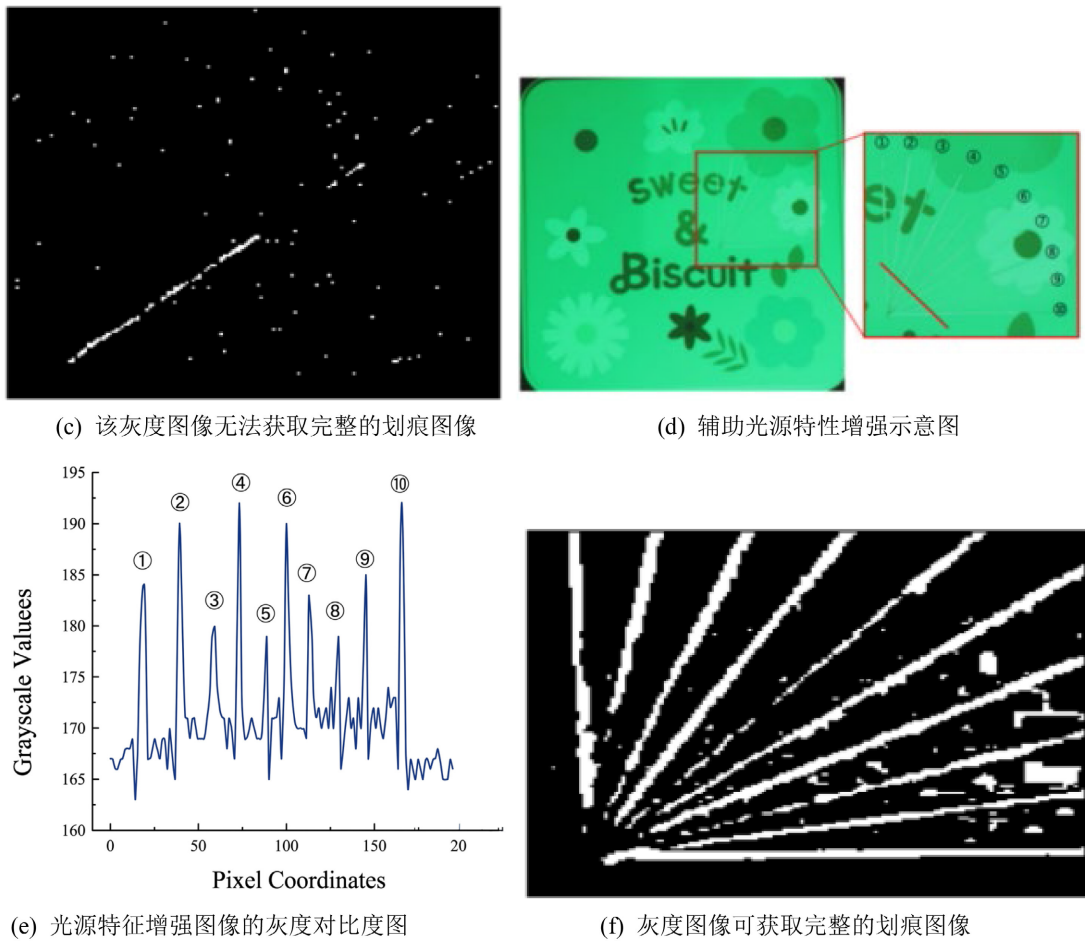


**Figure 4.** Schematic diagram of the experiment structure for light source model selection  
**图 4.** 光源模型选择实验结构示意图



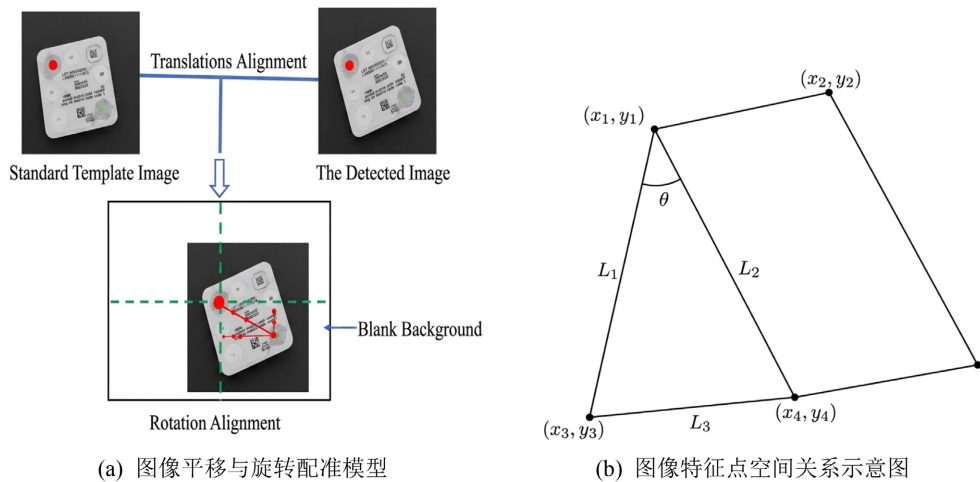
(a) 划痕损伤模板灰度图像

(b) 划痕损伤样本的灰度对比度图



**Figure 5.** Comparison diagram of scratch detection performance with enhanced auxiliary light source features  
**图 5.** 辅助光源特征增强的划痕检测效果对比示意图

### 3. 金属包装盒表面缺陷检测方法研究



**Figure 6.** Schematic diagram of image translation and rotation registration model  
**图 6.** 图像平移与旋转配准的原理示意图

图像配准是金属包装盒表面缺陷检测的关键步骤。首先，通过高斯滤波对图像进行降噪；其次，通过如图 6 所示的基于图像特征点的图像平移和旋转配准技术，将标准模板图像和测量图像精确对齐在空白背景板上。最后，对两幅对齐的图像进行图像差分，获得缺陷图像。然而，以下两个问题限制了图像的配准精度，这将导致差分后出现残留图像，从而严重影响后续图像缺陷的识别：首先对于带有缺陷边缘的感兴趣区域图像，通过常规配准方法获得的特征点坐标精度较低，导致配准精度低。其次常规配准方法只能进行整像素配准，而相机物理特性导致的低分辨率会降低配准精度。

### 3.1. 感兴趣区域的选择与特征点坐标提取

为了解决第一个问题，引入了利用最小二乘法的曲线拟合方法来提取带有缺陷边缘的感兴趣区域内中心点的坐标。公式推导如下：

$$Q(a,b,c) = \sum_{i=1}^n \delta_i = \sum_{i=1}^n (X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)^2 \quad (1)$$

因此，当参数  $a$ 、 $b$  和  $c$  的值被最小化时，即可得到所需曲线函数的参数。本研究比较了特征区域常用的灰度质心法和曲线拟合方法。两种方法获得的感兴趣区域特征点坐标分别为  $g_2$ 、 $f_2$ ，它们相对于标准点的误差为  $S_2$ 、 $S_1$ ，如图 7(b)所示。由于  $S_2 > S_1$ ，因此可以推断出，对于带有缺陷边缘的感兴趣区域图像，灰度质心法的精度不如曲线拟合方法。

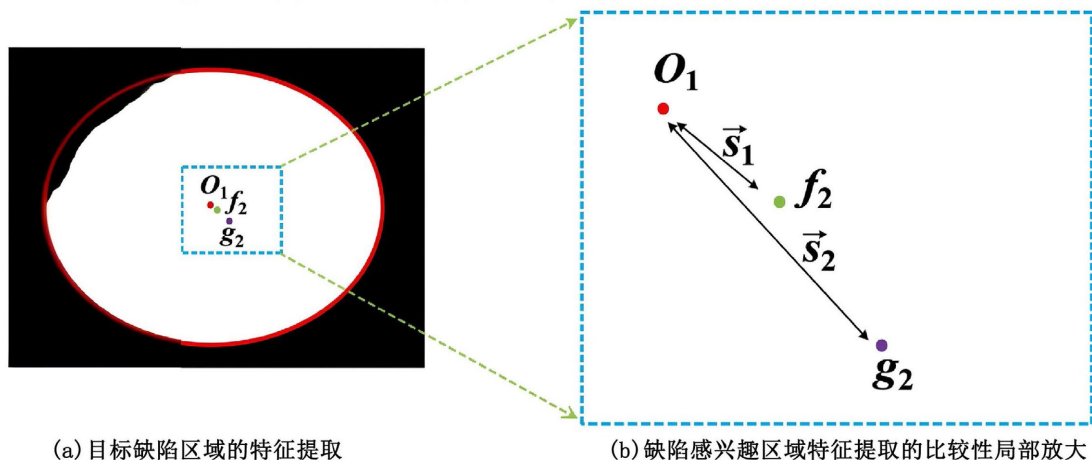
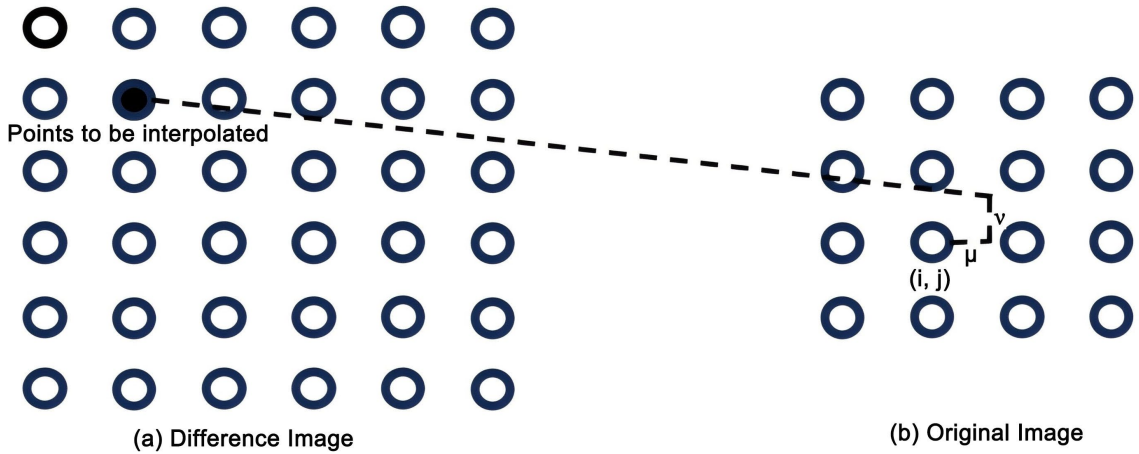


Figure 7. Schematic diagram of feature extraction for defect region of interest  
图 7. 缺陷感兴趣区域的特征提取原理示意图

### 3.2. 图像超分辨率重建技术研究

为了解决相机分辨率限制导致的配准精度不足问题，本文采用基于双三次插值的图像超分辨率重建方法对待配准图像进行上采样处理。该方法通过扩大图像像素尺度，将原始图像中难以直接表达的亚像素位移转化为重建图像中的可计算位移，从而将系统的配准步长由 0.5 像素细化至 0.125 像素，提升图像平移配准的精度。双三次插值利用目标像素邻域内  $4 \times 4$  范围的 16 个像素点进行加权计算，相比双线性插值能够更充分地利用邻域灰度变化信息，在保持图像边缘过渡连续性的同时减少锯齿和灰度突变现象，因此更适用于金属包装盒表面细微划痕与印刷缺陷检测中的亚像素配准任务。

原理如图 8 所示： $f(i, j)$  表示源图像点  $(i, j)$  处像素的灰度值。



**Figure 8.** Schematic diagram of the bicubic interpolation algorithm  
**图 8.** 双三次插值算法原理图

$$A = [W(\mu+1) \quad W(\mu) \quad W(\mu-1) \quad W(\mu-2)] \quad (2)$$

$$C = [W(\nu+1) \quad W(\nu) \quad W(\nu-1) \quad W(\nu-2)] \quad (3)$$

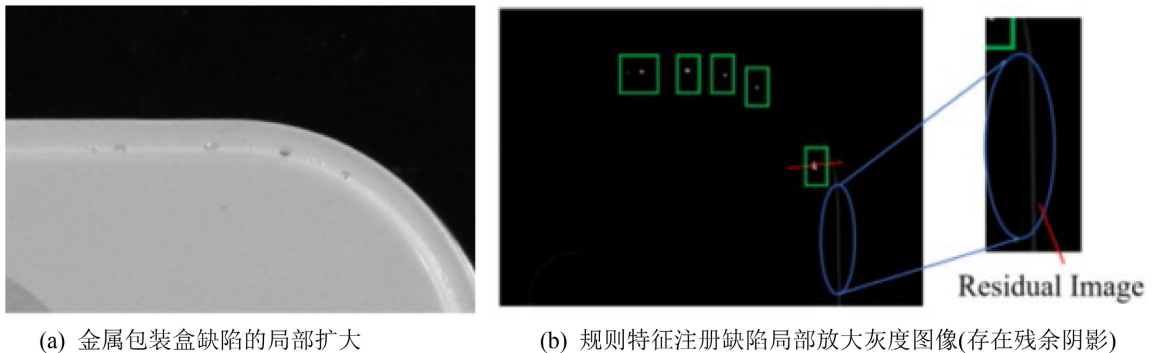
$$B = \begin{bmatrix} P(j-1,i-1) & P(j-1,i) & P(j-1,i+1) & P(j-1,i+2) \\ P(j,i-1) & P(j,i) & P(j,i+1) & P(j,i+2) \\ P(j+1,i-1) & P(j+1,i) & P(j+1,i+1) & P(j+1,i+2) \\ P(j+2,i-1) & P(j+2,i) & P(j+2,i+1) & P(j+2,i+2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$P(X,Y) = CBA^T \quad (5)$$

研究中对基于超分辨率重建的平移配准方法进行了对比实验。如图 9(b)、图 9(d)所示，在差分准像素平移配准中存在残留阴影，这严重影响了缺陷检测。基于超分辨率重建的平移配准成功消除了重影问题，从而可以准确识别缺陷特征。因此，与传统的准像素平移配准方法相比，该方法显著提高了图像配准的精度。

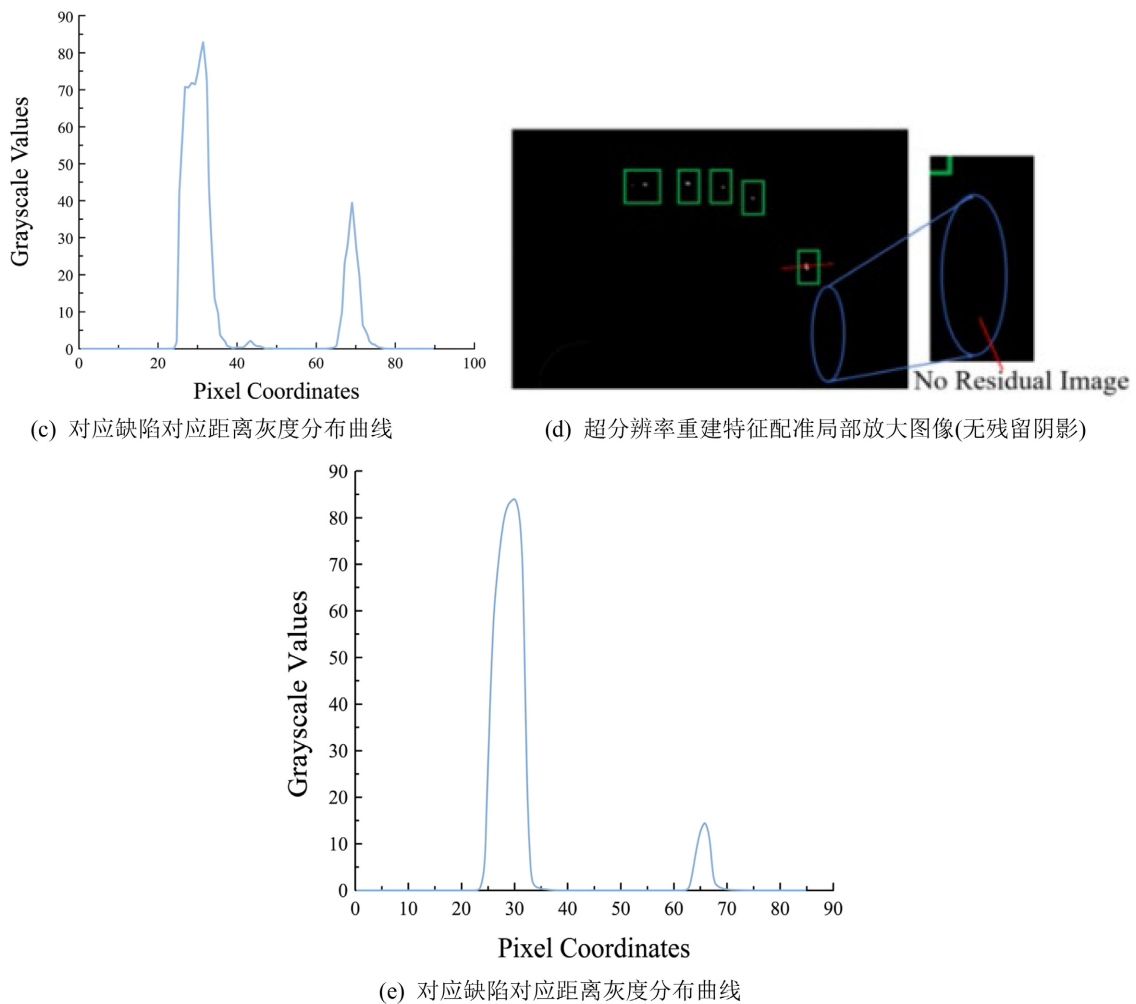
如图 9(c)、图 9(e)所示，与传统的平移配准方法相比，超分辨率重建配准方法可以显著降低 60~70 像素坐标区域的灰度值，从而将噪声和重影的灰度值降低至 20 以下。由于对应于缺陷损伤的特征值通常大于 60，因此在阈值分割过程中将背景噪声的阈值设置为 20，以确保缺陷检测不受影响。

通过亚像素配准和超分辨率重建配准验证实验，基于超分辨率重建的平移配准误差由 0.04 mm 降低至 0.005 mm，显著减小了由相机分辨率不足引起的配准误差。



(a) 金属包装盒缺陷的局部扩大

(b) 规则特征注册缺陷局部放大灰度图像(存在残余阴影)



**Figure 9.** Comparison diagram of defect detection performance between conventional feature registration and super-resolution reconstruction feature registration for metal packaging boxes

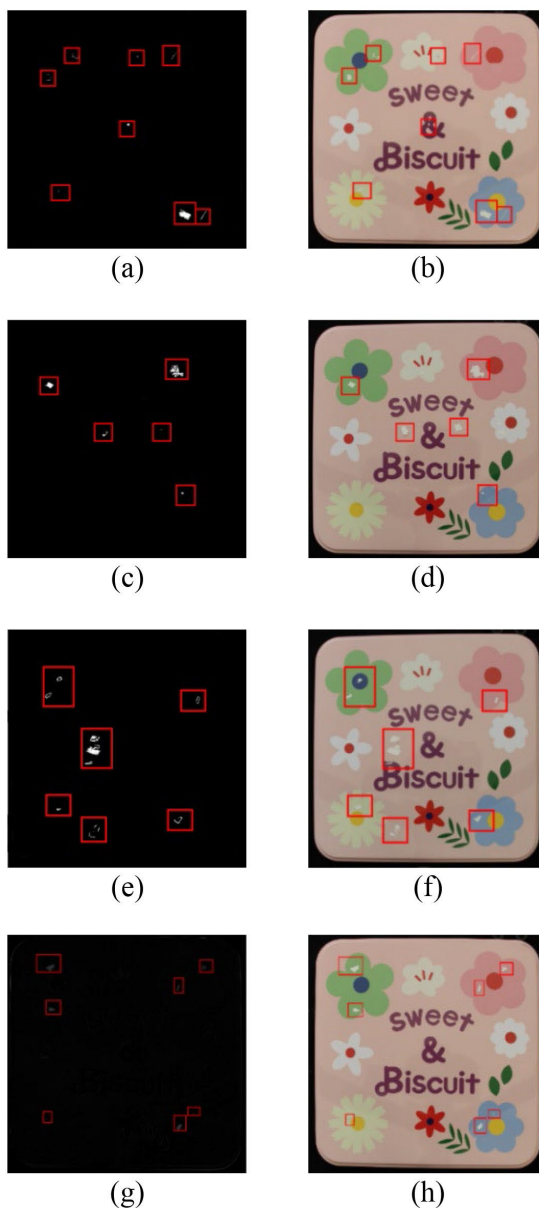
**图 9.** 金属包装盒缺陷检测中常规特征配准与超分辨率重建特征配准的效果对比示意图

#### 4. 基于图像形态学的金属包装盒缺陷分类研究

本研究提出了一种先进的图像处理框架，该框架集成了图像差分、空间域增强和阈值分割技术，以精确提取和分析缺陷特征。该方法不仅能够区分印刷缺陷和划痕损伤，还引入了一种基于缺陷比例计算的定量分类系统。通过结合二值化处理和颜色编码标注，该系统增强了操作人员对缺陷的可见性，显著提高了检测准确率和效率。

##### 4.1. 基于图像差分的图像缺陷特征提取技术研究

为了精确提取金属包装盒表面的缺陷特征信息，引入了一种利用图像差分的方法。具体而言，这对已经过模板配准的两幅灰度图像应用图像差分，从而消除相同区域，并保留代表金属包装盒表面缺陷信息的灰度图像。与传统特征提取方法相比，此方法能够同时检测零件表面的印刷缺陷和划痕损伤，且所需信息处理量极少，检测效率高。如图 10 所示，使用图像差分法结合图像增强和自定义阈值分割来识别和提取以下金属包装盒图像的缺陷。如果必须使用混合单位，请在方程式中明确标出每个数量的单位。



**Figure 10.** (a). (c). (e). (g) Differential image of metal packaging box. (b). (d). (f). (h) Identify, extract and identify image defects  
**图 10.** (a). (c). (e). (g)金属包装盒差分图像。(b). (d). (f). (h)识别、提取并标注图像缺陷

为了减轻图像差分后获得的残留图像对特征识别的影响，引入了一种结合图像增强和阈值分割的方法。此方法依赖于空间域图像增强，利用零件表面缺陷与误差阴影之间的灰度值差异来放大图像矩阵。这一过程保证了缺陷部分的灰度峰值与测试样本的灰度峰值相差大约 100，从而产生明显的差距，并利用阈值分割来消除增强图像中的阴影部分。

#### 4.2. 图像缺陷的识别与标注

为了帮助检测系统操作人员精确识别缺陷，通过二值化处理和缺陷特征信息分析对缺陷类型进行识别。图 11 中的印刷缺陷用红色突出显示，划痕损伤用绿色突出显示。

缺陷比例的计算公式定义如下：

$$K = \frac{\mu_2 - \mu_1}{v_2 - v_1} \quad (6)$$

当  $K$  超过 5.67 或低于 0.176 时，图像缺陷被分类为划痕损伤。

对于  $K$  介于 0.176 和 5.67 之间的值，计算以下公式：

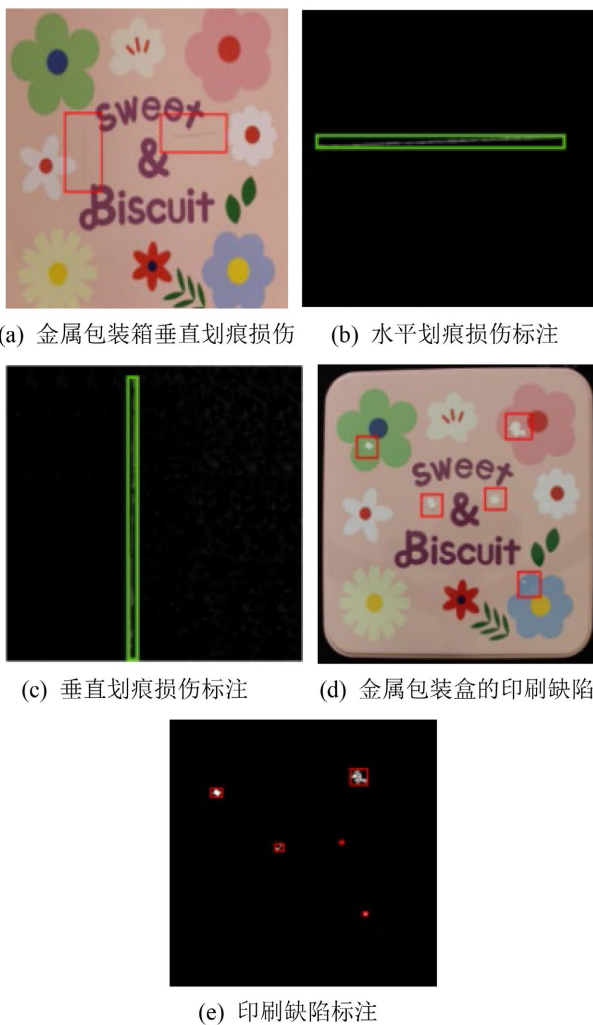
$$F = \frac{a}{b} \quad (7)$$

$$F = \frac{a}{(\mu_2 - \mu_1)(v_2 - v_1)} \quad (8)$$

如果“ $F$ ”小于 0.35，则图像缺陷被分类为划痕损伤；如果“ $F$ ”大于 0.35，则图像缺陷被分类为印刷缺陷。

公式中，“ $a$ ”表示缺陷区域的像素坐标点数，“ $b$ ”表示缺陷最小包围矩形的像素坐标点数，“ $\mu_2 - \mu_1$ ”指定最小包围矩形的长边长度，而“ $v_2 - v_1$ ”表示短边宽度。

图 11 为缺陷特征识别与标注。



**Figure 11.** Defect feature recognition and annotation  
**图 11.** 缺陷特征识别与标注

### 5. 实验分析

本文描述了一种利用辅助光源采集的金属包装盒表面质量在线检测系统的开发过程。如图 12 所示，系统由三部分组成：该系统包括笔记本电脑、CCD 相机、定焦镜头、带通滤光片和绿色光源等设备，有助于收集具有清晰金属包装盒表面特征的图像。该系统能够使用低分辨率相机进行准确的图像检测。现场操作检测界面如图 13 所示。

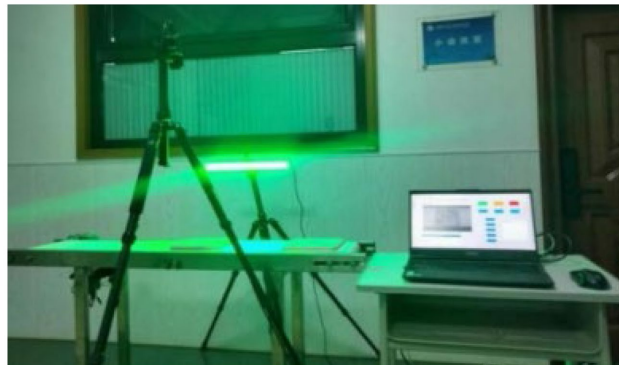


Figure 12. Online surface quality detection system for metal packaging boxes  
图 12. 金属包装盒在线表面质量检测系统

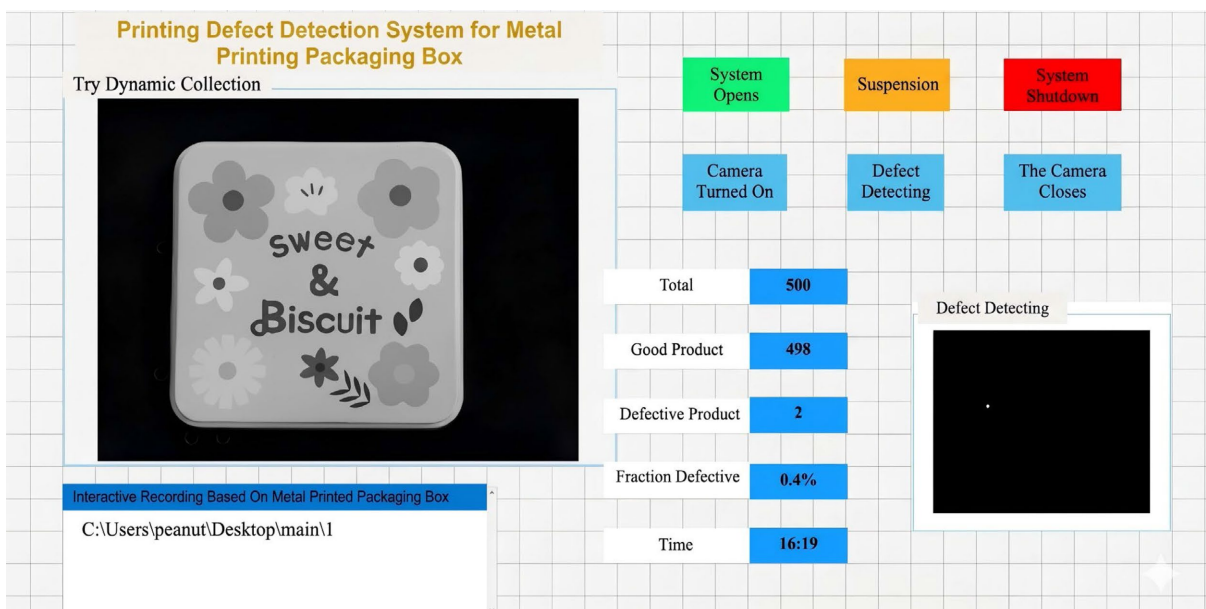


Figure 13. On-site operation detection interface  
图 13. 现场操作检测界面

Table 1. Accuracy of scratch damage and printing defect detection  
表 1. 划痕损伤和印刷缺陷检测准确率

损伤类型	待测总数	检出总数	划痕检出数	印刷检出数	整体准确率	单类准确率
划痕损伤	500	497	496	1	99.40%	99.20%
印刷缺陷	500	498	1	497	99.60%	99.40%

**Table 2.** Accuracy of comprehensive damage detection**表 2.** 综合损伤检测准确率

划痕损伤工件数：400		印刷缺陷工件数：400		完整工件数：200	
工件总数	检出划痕损伤工件数	检出印刷损伤工件数	整体检测准确率	划痕损伤检测准确率	印刷损伤检测准确率
1000	396	397	99.13%	99%	99.25%

在本研究中,进行了一项系统性实验以评估划痕损伤和印刷损伤的检测性能,具体结果如表 1 所示。实验设计包含两组测试样本,每组样本从 500 个相同损伤类型的样本中选取;在划痕缺陷检测中,系统成功识别出 497 个包含缺陷的样本,其中 496 个被准确分类为划痕缺陷,1 个被误分类为印刷缺陷,整体检测准确率为 99.4%,划痕分类准确率为 99.2%。在印刷缺陷检测中,系统识别出 498 个包含缺陷的样本,其中 497 个被正确分类为印刷缺陷,1 个被误分类为划痕缺陷,整体检测准确率为 99.6%,印刷缺陷分类准确率为 99.4%。

此外,考虑到相同类别中广泛存在划痕损伤、印刷缺陷和正常工件混合存在的情况,设计了表 2 作为补充实验以进一步完善表 1 的实验框架。具体设计细节如下:共选取了 400 个带有划痕损伤的工件、400 个带有印刷缺陷的工件以及 200 个无缺陷工件。其中,成功检测到 396 个划痕损伤工件和 397 个印刷缺陷工件,总体检测准确率为 99.125%。具体而言,划痕损伤的检测准确率为 99%,而印刷缺陷的检测准确率为 99.25%。实验数据表明,所提出的检测方法对这两种类型的缺陷均表现出优异的识别性能。

## 6. 结论

本文针对金属包装盒表面缺陷检测过程中图像特征获取不稳定、配准精度不足以及细微缺陷识别困难等问题,提出了一种基于机器视觉的金属包装盒表面损伤检测改进方法。通过分析金属包装盒表面反射特性,构建了辅助光源成像方案,提高了划痕和印刷缺陷在图像中的可辨识度;在此基础上,引入基于双三次插值的超分辨率重建配准方法,减小了相机分辨率不足带来的配准误差;最后,结合图像差分、阈值分割和形态学特征分析,实现了划痕损伤与印刷缺陷的提取和分类。

实验结果表明,所提出的方法能够有效识别金属包装盒表面的典型损伤类型,并可检测实验条件下宽度约 0.08 mm 的细微划痕,满足企业对大于 0.1 mm 表面缺陷检测的基本需求。该方法在提高检测精度、降低对超高分辨率相机依赖以及提升检测效率方面具有一定应用价值。后续研究将进一步面向复杂背景、未知缺陷类型和真实产线环境开展优化,以提升系统的鲁棒性和工程适用性。

## 7. 局限性与未来工作

尽管本文所提出的方法在划痕损伤和印刷缺陷识别中取得了较好的检测效果,但从实际工业应用角度来看,仍存在一定局限性。本文实验主要在光照和背景相对可控的条件下开展,而实际生产环境中,金属包装盒表面可能受到油污、灰尘、复杂印刷图案、局部强反光以及输送振动等因素影响。当缺陷特征与背景纹理或反光区域较为接近时,仍可能出现误检或漏检现象。

此外,本文主要针对划痕损伤和印刷缺陷两类典型缺陷进行识别,所采用的缺陷比例、最小外接矩形等形态学特征对规则性较强的缺陷具有较好适用性,但对于凹陷、压痕、掉漆、复合型缺陷以及未知缺陷类型,其分类能力仍有进一步提升空间。同时,图像差分方法对模板图像与待测图像之间的配准精度具有较高依赖,若样品姿态偏移较大或存在局部形变,差分结果中可能产生残留阴影,从而影响后续缺陷提取。

后续研究将进一步面向真实生产线环境开展优化。一方面,可结合多角度光照、偏振成像或自适应

光源调节方法, 提高复杂背景下缺陷特征的可分性; 另一方面, 可引入深度学习、异常检测或开放集识别方法, 增强系统对未知缺陷和复杂缺陷的识别能力。同时, 还需在更大样本量和连续生产条件下开展在线测试, 以验证系统的长期稳定性和工程适用性。

## 致 谢

本工作得到以下基金项目的支持: 国家自然科学基金(编号: 52205554); 辽宁省教育厅基础科研项目(编号: LJ212410152035; LJ212410152024; LJ212410152033)。

## 利益冲突

作者声明不存在利益冲突。

## 声 明

本研究开发了一种用于金属印刷包装盒的非接触式高精度表面缺陷检测系统, 解决了食品和制药行业人工检查的局限性。通过集成超分辨率重建技术, 该方法有效减少了图像伪影, 使缺陷识别更加清晰。基于高级曲线拟合的特征提取进一步提高了检测细微缺陷的准确性。所提出的自动化系统显著提高了检测的可靠性和效率, 满足了工业生产对表面质量的严格要求。它的实际应用能够最大程度地减少次品, 降低成本, 增强印刷厂的质量控制, 为自动化制造和包装行业提供巨大价值。

## 参考文献

- [1] Yu, Z., Wu, X. and Gu, X. (2017) Fully Convolutional Networks for Surface Defect Inspection in Industrial Environment. In: Liu, M., Chen, H. and Vincze, M., Eds., *Computer Vision Systems*, Springer, 417-426. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-68345-4\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68345-4_37)
- [2] Konovalenko, I., Maruschak, P. and Brevus, V. (2021) Steel Surface Defect Detection Using an Ensemble of Deep Residual Neural Networks. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, **22**, Article ID: 014501. <https://doi.org/10.1115/1.4051435>
- [3] Liu, Q., Wang, C., Li, Y., Gao, M. and Li, J. (2022) A Fabric Defect Detection Method Based on Deep Learning. *IEEE Access*, **10**, 4284-4296. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3140118>
- [4] Lamb, J., Echlin, M., Polonsky, A., Geurts, R., Pusch, K., Raeker, E., et al. (2022) Merging Machine Learning and Tribeam Tomography for 3D Defect Detection in an AM Coni-Based Superalloy. *Microscopy and Microanalysis*, **28**, 862-863. <https://doi.org/10.1017/s1431927622003828>
- [5] Bouzenad, A.E., Yaacoubi, S., Montresor, S. and Bentahar, M. (2022) A Model-Based Approach for In-Situ Automatic Defect Detection in Welds Using Ultrasonic Phased Array. *Expert Systems with Applications*, **206**, Article ID: 117747. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117747>
- [6] Nayak, J.P.R. and Parameshachari B. D., (2022) Defect Detection in Printed Circuit Boards Using Leaky-Lenet 5. *International Journal of Software Innovation*, **10**, 1-13. <https://doi.org/10.4018/ijsi.309726>
- [7] Vu, T., Pham, D. and Chang, T. (2023) A Yolo-Based Real-Time Packaging Defect Detection System. *Procedia Computer Science*, **217**, 886-894. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.285>
- [8] Suresh, B.R., Fundakowski, R.A., Levitt, T.S. and Overland, J.E. (1983) A Real-Time Automated Visual Inspection System for Hot Steel Slabs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **5**, 563-572. <https://doi.org/10.1109/tpami.1983.4767445>
- [9] Gupta, G. (2011) Algorithm for Image Processing Using Improved Median Filter and Comparison of Mean, Median and Improved Median Filter. *International Journal of Soft Computing Engineering*, **1**, 304-311.
- [10] Lee, J., Shim, S., You, B. and Hwang, D. (2014) Design of Line Scratch Detection and Restoration Algorithm Using GPU. *Journal of the Korea Society of Computer and Information*, **19**, 9-16. <https://doi.org/10.9708/jksci.2014.19.4.009>
- [11] Li, K.B., Yu, H.Y. and Zhou, S.J. (2018) Surface Scratch Detection of Mechanical Parts Based on Morphological Features. *Acta Optica Sinica*, **38**, Article ID: 0815027. <https://doi.org/10.3788/aos201838.0815027>
- [12] Ding, W., Wang, Q. and Zhu, J. (2020) Automatic Detection of Dispersed Defects in Resin Eyeglass Based on Machine Vision Technology. *IEEE Access*, **8**, 44661-44670. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2978001>

- 
- [13] Mar, N.S.S., Yarlalagadda, P.K.D.V. and Fookes, C. (2011) Design and Development of Automatic Visual Inspection System for PCB Manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **27**, 949-962. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2011.03.007>
- [14] Barua, S., Liou, F., Newkirk, J. and Sparks, T. (2014) Vision-Based Defect Detection in Laser Metal Deposition Process. *Rapid Prototyping Journal*, **20**, 77-85. <https://doi.org/10.1108/rpj-04-2012-0036>
- [15] He, P., Sun, X. and Zhou, G. (2020) Defect Detection of Energized Grid Based on Machine Vision. 2020 *IEEE 5th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP)*, Nanjing, 23-25 October 2020, 376-380. <https://doi.org/10.1109/icsip49896.2020.9339254>
- [16] Colvarkar, A., Pawar, S.S. and Patle, B.K. (2023) In-pipe Inspection Robotic System for Defect Detection and Identification Using Image Processing. *Materials Today: Proceedings*, **72**, 1735-1742. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.476>
- [17] Liu, G. and Zheng, X. (2021) Fabric Defect Detection Based on Information Entropy and Frequency Domain Saliency. *The Visual Computer*, **37**, 515-528. <https://doi.org/10.1007/s00371-020-01820-w>