

基于硬件的复杂光照环境多材质机器视觉特征提取研究

戴洋¹, 张艺^{1,2}, 赵欣^{1,2}, 段智魁², 张海明^{1*}

¹天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

²天津普达软件技术有限公司, 天津

收稿日期: 2026年4月21日; 录用日期: 2026年6月17日; 发布日期: 2026年6月29日

摘要

在智能制造非受控复杂光照场景中, 常规可见光机器视觉系统易受强杂散光干扰, 产生高光过曝、阴影畸变等问题, 造成伪边缘误检与几何细节丢失, 而传统后端算法补偿存在时间延迟、无法还原感光超限丢失信息的固有瓶颈。对此, 本文将抗干扰环节物理前置, 提出一套“近红外主动照明 + 窄带光谱滤波 + 微秒级硬件同步触发”的软硬件协同抗干扰成像方法。该方法基于太阳光谱940 nm水汽吸收谷的天然物理特性确立工作波段, 搭建了配套的成像与照明硬件平台, 建立多维图像质量客观评价体系完成高反光、强吸光、漫反射三类典型工业材质的成像参数自适应寻优, 并通过Sobel与Canny经典算子验证边缘提取效能。实验结果表明, 该方法可从成像源头有效抑制杂散光干扰, 显著降低背景灰度波动, 将三类工业材质的伪边缘像素占比压缩至0.01%以下, 大幅提升了复杂光照下多材质目标边缘特征提取的精度与鲁棒性, 拓宽了机器视觉在非受控工况下的应用边界。

关键词

机器视觉, 太阳光谱特性, 近红外主动照明, 窄带滤波, 边缘检测

Hardware-Based Research on Machine Vision Feature Extraction for Multi-Material Targets in Complex Illumination Environments

Yang Dai¹, Yi Zhang^{1,2}, Xin Zhao^{1,2}, Zhikui Duan², Haiming Zhang^{1*}

¹School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

²Tianjin Puda Software Technology Co., Ltd., Tianjin

*通讯作者。

文章引用: 戴洋, 张艺, 赵欣, 段智魁, 张海明. 基于硬件的复杂光照环境多材质机器视觉特征提取研究[J]. 光电子, 2026, 16(2): 67-76. DOI: 10.12677/oe.2026.162007

Abstract

In uncontrolled complex illumination scenarios of intelligent manufacturing, conventional visible light machine vision systems are susceptible to strong stray light interference, which causes problems including highlight overexposure and shadow distortion, further leading to false edge misdetection and loss of geometric details. Traditional back-end algorithm compensation, however, has inherent bottlenecks: it introduces time delay and is unable to restore information lost due to sensor saturation. To address this challenge, this paper physically advances the anti-interference link to the front end of the imaging chain, and proposes a hardware-software collaborative anti-interference imaging scheme integrating near-infrared active illumination, narrow-band spectral filtering, and microsecond-level hardware synchronous triggering. Based on the natural physical characteristics of the water vapor absorption valley at 940 nm in the solar spectrum, this method determines the optimal operating waveband, constructs a matched imaging and illumination hardware platform, establishes a multi-dimensional objective evaluation system for image quality to complete adaptive optimization of imaging parameters for three typical industrial materials (high-reflective, strong light-absorbing and diffuse reflective materials), and verifies its edge extraction performance via the classical Sobel and Canny operators. The experimental results show that the proposed method can effectively suppress stray light interference from the imaging source, significantly reduce background gray level fluctuation, compress the proportion of false edge pixels for all three types of industrial materials to less than 0.01%, greatly improve the accuracy and robustness of edge feature extraction for multi-material targets under complex illumination, and broaden the application boundary of machine vision in uncontrolled working conditions.

Keywords

Machine Vision, Solar Spectral Characteristics, Near-Infrared Active Illumination, Narrow-Band Filtering, Edge Detection

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

在智能制造工程中，机器视觉系统是核心的感知与决策单元[1]。然而，当应用场景向非受控的车间与户外环境延伸时，系统对动态环境光照的适应能力面临严峻挑战。常规的广谱可见光成像系统暴露于强杂散光下极易产生严重的光学畸变：表面光滑的金属件易引发镜面反射导致高光过曝，而漫反射件则易受侧向光侵入形成高对比度破坏性阴影。这种由光照突变引发的明暗交界线不仅会掩盖真实物理纹理，更会被边缘检测算法误判为真实轮廓，生成大量破坏性的伪边缘。

目前，工业界多倾向于通过优化后端软件算法或采用高动态范围等多曝光融合技术进行补偿[2]-[5]。但多帧合成引入了时间延迟与运动伪影，难以满足高速生产线“单次曝光、实时获取”的节拍要求；单纯依赖软件算法也无法凭空捏造出因传感器过曝而丢失的底层几何细节。

为突破这一工程瓶颈，本文摒弃了滞后的算法补偿范式，将抗干扰环节物理前置。本文设计了一套具备微秒级硬件同步触发机制的近红外抗干扰成像平台，并深入探讨不同光学反射特性材质在极端光照

下的参数响应规律，最终通过经典微分算子验证该物理架构对边缘特征提取精度的实质性增益。

2. 实验方法

在非受控的自然光照或复杂工厂照明体系下，彻底消除杂散光破坏的先决条件是深刻理解光源的物理分布，并在系统设计的第一环建立起绝对高效的光谱隔离屏障。本节将详细阐述抗干扰波段的理论推演、光电元件的物理选型适配、微秒级硬件同步系统的搭建，以及用于量化抗干扰效能的多维数学评价体系。

2.1 抗干扰波段选择与太阳光谱特性

太阳辐射作为自然界中最庞大且最不可控的宽带光源，其光谱覆盖范围极其广泛，横跨紫外、可见光至中远红外(约 300 nm 至 2400 nm)。大气外层的太阳光谱(AM0 模型)与穿透大气层抵达地表的太阳光谱(AM1.5 模型)在能量分布上存在着显著的衰减差异。太阳辐射的能量主要集中在 400 nm 至 700 nm 的可见光区域[6]。

然而，当太阳辐射穿透地球大气层时，并非所有的电磁波段都遵循一致的衰减率。受大气中气体分子与气溶胶的散射及共振吸收作用影响，特定频段的辐射强度会发生断崖式的物理衰减。特别是在近红外波段，水分子的振动-转动吸收机制对太阳辐射产生了极其强烈的选择性吸收。地面实测太阳光谱辐照度数据表明，这种大气吸收机制在波长 940 nm、1140 nm 及 1380 nm 附近刻画出了三个极深的物理“吸收谷”。其中，位于 940 nm 附近的吸收谷不仅具有超过 37 nm 的宽阔半高宽。

相较于可见光峰值，940 nm 波段的自然光本底噪声已被大气层天然削弱了近 85%。同时，相比于常用于夜视或普通补光的 850 nm 近红外频段，940 nm 波段的背景杂散光本底噪声仅为前者的四分之一到三分之一。基于这一宏观自然物理现象，本研究从理论上确立了 940 nm 作为规避强自然光干扰的最佳中心工作波段。利用大气吸收的天然物理衰减，系统在抗干扰设计的初始阶段便从本底上规避了绝大部分散粒噪声的生成，为后续建立纯净的光电视野奠定了坚实的自然科学基础。

2.2. 成像传感器适配性与窄带滤波系统分析

在确立了自然光谱的极小值工作波段后，系统面临的核心工程挑战是如何选择具有高效光子捕获率且具备极强光谱过滤能力的成像硬件链。

首先是光电传感器的材料物理特性分析。目前机器视觉领域最普遍使用的是硅基 CMOS 工业相机[7]。硅材料具备成熟的半导体制造工艺，赋予了其极高的性价比、极低的本底热噪声和极高的读取帧率。然而，硅材料自身存在 1.1 eV 的带隙能量限制。根据普朗克-爱因斯坦关系，当入射光子波长逐步逼近或超出 1100 nm 时，单个光子的能量将不足以激发硅晶格中的电子跃迁至导带，导致传感器的量子效率急剧下跌至 10% 以下，从而呈现出物理上的“光电迟钝”状态。尽管基于铟镓砷材料的短波红外相机在 900 nm 至 1700 nm 波段内的量子效率可稳定维持在 70% 以上，能够完美覆盖水汽吸收谷，但其动辄数十倍于硅基相机的制造成本，构成了阻碍大规模智能制造现场部署的致命瓶颈。

综合考量感光极限与工程成本，本系统最终选用了一款近红外增强型的硅基海康 MV-CA013-20GN 工业相机。该相机通过特殊的微透镜与底层半导体掺杂工艺优化，在可见光至 1100 nm 波段边界处维持了极佳的量子效率与响应灵敏度，足以捕获 940 nm 波段内的高频微弱反射光信号。镜头主要参数如表 1 所示。

在此高灵敏度传感器的前方，系统设置了光学抗干扰的第一道绝对防线——定制的窄带干涉滤光片。该滤光片的中心透射波长被严格锚定在 940 nm，且半高宽被极致压缩至 10 nm。通过精密的光学薄膜多

层镀膜工艺，该滤光器件在 940 nm 的中心通带处展现出了极高的峰值透射率，确保目标有效反射信号无损穿透；同时，在通带之外的可见光至广谱近红外频段，滤光片呈现出极高的截止深度。这种物理层面上的硬性光谱剥离，将工业现场漫天散布的广谱太阳辐射、车间频闪照明等背景杂散光悉数反射或吸收。通过将透射光谱与 940 nm 太阳辐射吸收谷在波长域上的精准叠合，系统在光电转换发生的最前端完成了高信噪比的原始积累。

Table 1. Main parameters of the lens

表 1. 镜头主要参数

名称	参数
像面尺寸	$\Phi 9$ mm
焦距	8 mm
F 数	F2.8~F16
光学畸变	-0.96%
最近摄距	0.05 m
操作方式	光圈：手动(锁紧结构)；聚焦：手动(锁紧结构)
工作温度	-10℃~50℃
最大靶面	1/1.8"

2.3. 硬件同步实验系统与多维客观评价体系

本研究的实验平台物理架构主要包括机械支撑子系统、垂直同轴光学成像子系统以及微秒级硬件同步触发链路。光学采集链由前述的近红外相机、低畸变工业镜头及 940 nm 窄带滤光片组成。照明端则定制开发了一款最大瞬间额定功率可达 150 W 的大口径近红外环形 LED 光源。该光源采用与相机视轴高度同轴化的物理布局套载于镜头前方，确保为旋转平台上运动的待测非标准表面工件提供大面积、无死角的高均匀度漫射补光，从照明几何学角度彻底抹除了侧向自然杂光引发的高反差阴影。

在控制层面，旋转测试平台边缘装有高速响应光电开关。当载物台将待测目标输送至预设的物理抓拍原点时，光电开关产生的边缘阶跃电平瞬间生成硬触发信号。该信号无缝绕过上位机操作系统的软件延迟，直接在微秒级别同步下达至相机图像采集卡与光源频闪控制器。接收到硬触发后，LED 光源瞬间切入瞬态超频模式，爆发出远超额定状态的峰值光强；与此同时，CMOS 传感器开启极短时间的高速全局曝光。这种“瞬态高能照明 + 极短曝光时间”的底层策略，能在极短积分时间窗口内，使得 940 nm 的有效反射光通量呈现压倒性优势，再次从时间域上压缩了环境杂光的积分权重，构筑了坚不可摧的抗干扰链路。

为了对这种硬件重构带来的成像改善进行严谨的数学量化，本研究建立了一套不依赖于主观视觉的多维图像质量客观评价指标体系。这套指标直接对接后续的特征提取算法需求：

1. 图像信息熵

依据香农信息论，信息熵量化了图像灰度分布的随机性质与不确定度，代表了图像包含的有效细节丰富程度[8]。对于受到严重过曝或死黑干扰的图像，大量像素聚集在极端灰度级，导致信息量归零；而

在本系统的均匀光场下，信息熵 H 将显著提升。假设图像灰度级范围为 $[0, L-1]$ ：

$$H = -\sum_{i=0}^{L-1} p(i) \log_2 p(i) \quad (2.1)$$

其中 $p(i)$ 表示灰度值为 i 的像素点出现的概率。

2. 灰度标准差

反映了全局图像灰度值偏离均值的离散状况，是衡量有效动态对比度的核心参数[9]。对于尺寸为 $M \times N$ 的图像，均值为 μ ，标准差 σ 为：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (f(x, y) - \mu)^2} \quad (2.2)$$

特别需要指出的是，在非受控光照下，强光直射与深重阴影的撕裂会导致极其虚高的伪方差。真正的成像改善往往表现为去除伪方差后，标准差回归到反映物体表面真实纹理的合理区间。

3. 平均梯度

平均梯度对图像内部高频微小细节的反差变化极为敏感，直接表征了画面的局部清晰度与边缘锐度[10]。平均梯度的数值越大，代表目标物理轮廓在图像空间域内的阶跃越明显。对于后续微分算子的稳定响应至关重要。

$$G = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} \sqrt{\frac{(f(x+1, y) - f(x, y))^2 + (f(x, y+1) - f(x, y))^2}{2}} \quad (2.3)$$

4. 空间域信噪比

用于度量有效近红外反射信号相比于残留太阳光背景噪声的压倒性程度[11]。通过提取局部平滑区域的背景方差 σ_n^2 作为噪声估计：

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y)^2}{\sigma_n^2} \right) \quad (2.4)$$

极高的 SNR 值意味着后续任何分割与特征提取都不易被背景杂波误导。

2.4. 边缘提取算法机理与光照敏感性机制

在机器视觉的数学建模中，边缘提取的本质是通过局部微分运算寻找二维信号灰度急剧变化的极值点。本研究以工业界最经典的 Sobel 算子和 Canny 算子为基础验证工具，这两类算子对原始输入图像的光照均匀度有着近乎苛刻的要求。

Sobel 算子是一类基于一阶导数离散差分的算子，通过特定的 3×3 卷积模板对原始图像执行水平 G_x 和垂直 G_y 方向的梯度求导，其绝对梯度幅值为 $G \approx |G_x| + |G_y|$ 。Sobel 计算轻量高效，但由于仅仅依赖简单的微分幅值阈值判定，一旦环境光在金属表面产生细碎的镜面反射高光斑，或者在塑料表面投射出高对比度阴影边界，Sobel 算子会不可避免地产生宽大、多像素响应的破坏性伪边缘[12]。

Canny 算子则是一套更为精密严谨的边缘提取流水线，其设计初衷是同时满足信噪比准则、定位精准准则和单响应准则[13]。首先，它采用二维高斯平滑滤波器滤除随机高频噪声。随后，在计算完梯度幅值与方向后，执行核心的非极大值抑制操作，确保边缘点在局部梯度方向上绝对唯一，从而将粗边缘细化为单像素宽度。最后，算法采用高度敏锐的滞后双阈值进行边缘连接。在这套精密严密的逻辑下，如

果原始图像存在光照坍塌或大面积阴影，原本连贯的物理边缘其局部梯度将瞬间跌破低阈值，导致算法在连接步骤中抛弃该线段，致使目标几何拓扑严重断裂。因此，唯有通过前端物理抗干扰硬件输送纯净的灰度场，方能彻底释放 Canny 算法的单像素级精密检测潜力。

3. 图像质量客观评价与多材质自适应寻优

为了全面验证上述软硬件协同物理隔离方案的工程效能，本研究搭建了模拟极高强度户外自然直射光的物理验证平台。通过严格控制变量原则，我们将针对无滤光常规模式与 940 nm 抗干扰模式展开直方图层面的客观对比；更进一步，将针对三种光学反射特性截然不同的工业典型材质，开展不同曝光极限下的全矩阵指标量化寻优，以印证系统的跨材质普适应与环境抗扰动性。

3.1. 高反光材质的参数寻优

如图 1，金属加工件极易诱发强烈的镜面反射溢出。实验在 400 μs 、576 μs 和 841 μs 区间内进行测试。如表 2，数据表明，随着曝光时间拉长，信息熵出现虚高由 4.1 升至 5.1，但特征点提取数量却发生断崖式下跌由 353 跌至 133。这证实全局亮度的提升实为局部高光溢出引发的无效离散。因此，针对高反光材质，必须严格执行 400 μs 短曝光策略，强制压制高光斑，使有效特征点提取数量实现了 296.6% 的激增。

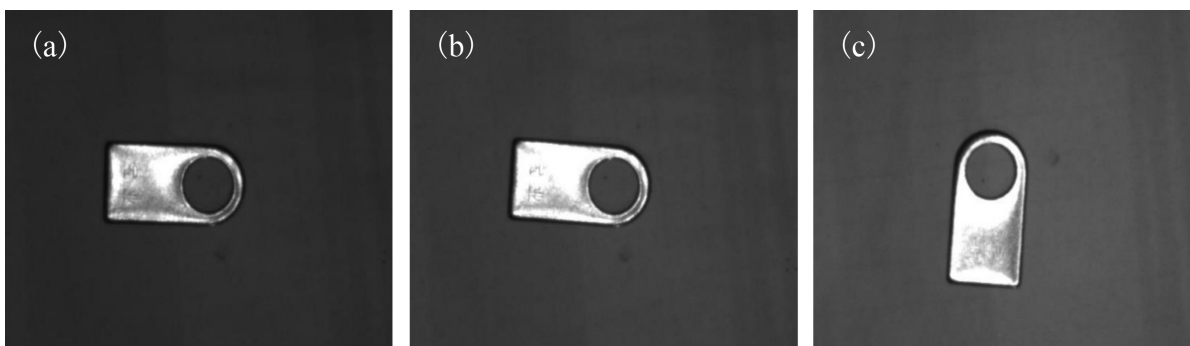


Figure 1. (a)~(c) are images taken at exposure times of 400 μs , 576 μs , and 841 μs , respectively

图 1. (a)~(c)分别是在曝光时间 400 μs 、576 μs 和 841 μs 时拍摄的图像

Table 2. Parameters of images of reflective objects captured at different exposure times

表 2. 反光物体在不同曝光时间拍摄图像参数

曝光时间	特征点提取	信息熵
400 μs	353	4.1
576 μs	241	4.5
841 μs	133	5.1

3.2. 强吸光材质的参数寻优

生锈工件表面粗糙且对近红外光有强吸收作用，易形成暗部死区。如图 2，系统选取了 2704 μs 、3249 μs 和 3669 μs 长曝光组进行交叉评估。随着曝光时间增加，见表 3，图像平均梯度与标准差呈现先升后降的抛物线趋势。在 3249 μs 长曝光时，平均梯度达到 12.1 的峰值，生锈表面的暗部粗糙纹理和真实对比度被最大程度还原。盲目再增加曝光则会导致背景泛白，灰度层次被压缩。

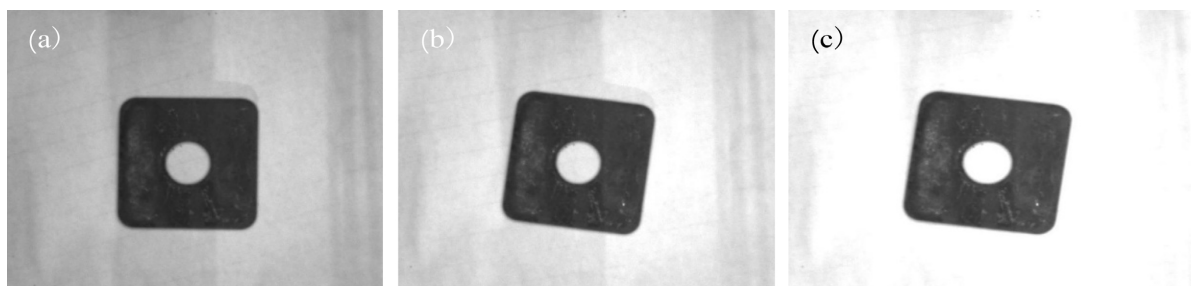


Figure 2. (a)~(c) in the figure are images taken at exposure times of 2704 μs , 3249 μs , and 3669 μs , respectively
图 2. 图中(a)~(c)分别是在曝光时间 2704 μs 、3249 μs 和 3669 μs 时拍摄的图像

Table 3. Parameters of images of rusted objects captured at different exposure times
表 3. 生锈物体在不同曝光时间拍摄图像参数

曝光时间	平均梯度	标准差
2704 μs	10.7	49.2
3249 μs	12.1	59.9
3669 μs	10.4	39.9

3.3. 漫反射材质的参数寻优

如图 3，塑料材质自身对比度低，极易被环境光投射出高反差的伪阴影。如表 4，在 1225 μs 至 2500 μs 的测试区间内，2025 μs 中等曝光呈现出最佳平衡：信噪比稳定，且去除了由于过曝导致的白化压缩或欠曝导致的目标混叠。该曝光时间彻底剥离了环境杂散光造成的伪对比度陷阱，真实还原了目标自身的物理本底灰度。

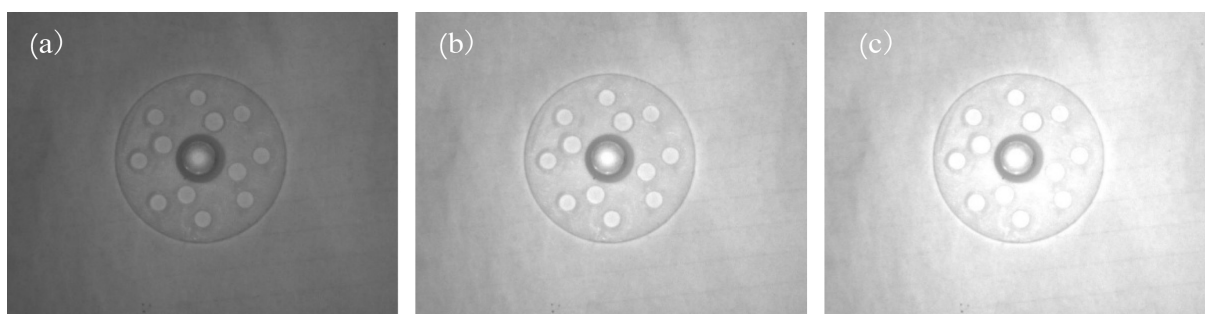


Figure 3. (a)~(c) in the figure are images taken at exposure times of 1225 μs , 2025 μs , and 2500 μs , respectively
图 3. 图中(a)~(c)分别是在曝光时间 1225 μs 、2025 μs 和 2500 μs 时拍摄图像

Table 4. Image parameters of plastic objects under different exposure times
表 4. 塑料物体在不同曝光时间拍摄图像参数

曝光时间	信噪比	对比度
1225 μs	19.9	93
2025 μs	19.9	136
2500 μs	20.6	110

4. 边缘特征提取工程应用验证

为检验高质量底片对高级视觉任务的赋能效果，本文将优化后的参数及图像导入经典的 Sobel 与 Canny 算子中，在强自然光干扰环境下开展交叉验证。在模拟强直射杂散光的恶劣工况下，传统无滤光可见光成像会导致严重的背景灰度波动。

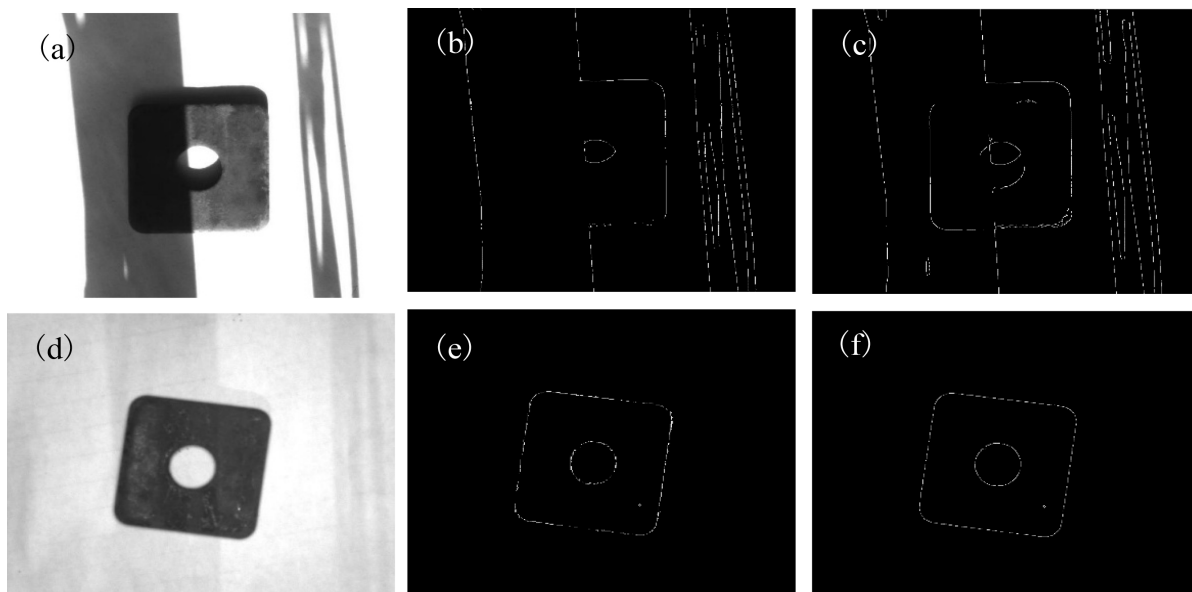


Figure 4. Image (a) shows the rusty object before improvement; image (d) shows it after improvement. Images (b) and (c), and (e) and (f) are the Sobel and Canny edge detection results of (a) and (d), respectively

图 4. 图(a) 生锈物体改善前拍摄图像；图(d) 改善后拍摄图像；图(b)和(c)与(e)和(f)分别是(a)和(d)的 Sobel 和 Canny 算法边缘提取结果

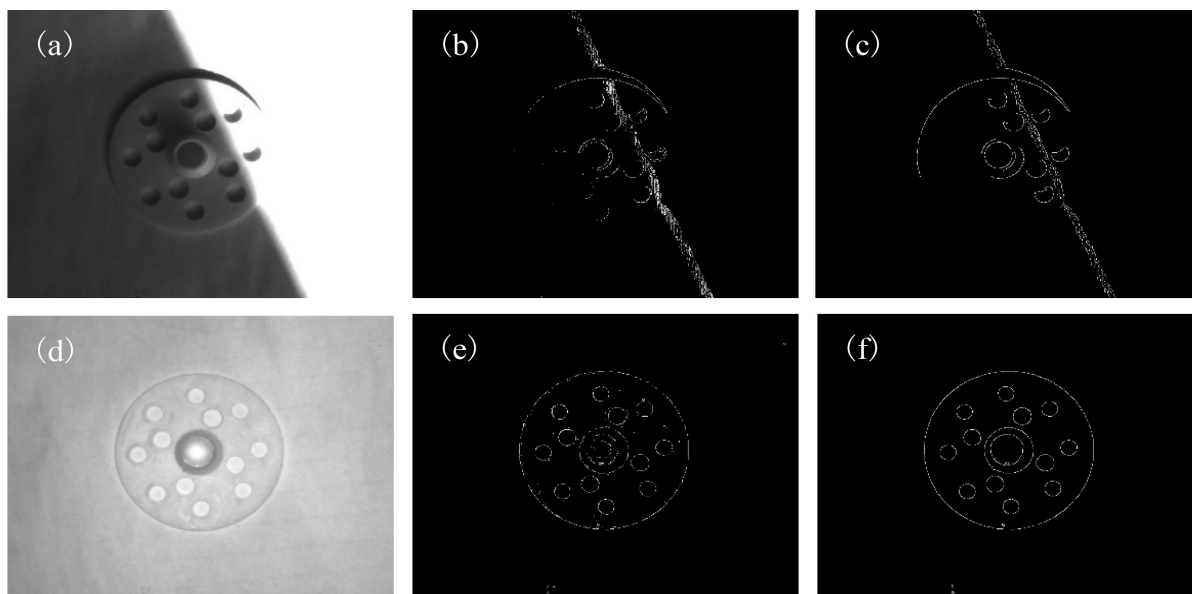


Figure 5. Image (a) of the plastic object before improvement; Image (d) after improvement. Image (b) and (c) and (e) and (f) are the Sobel and Canny edge detection results of (a) and (d), respectively

图 5. 图(a) 塑料物体改善前拍摄图像；图(d) 改善后拍摄图像；图(b)和(c)与(e)和(f)分别是(a)和(d)的 Sobel 和 Canny 算法边缘提取结果

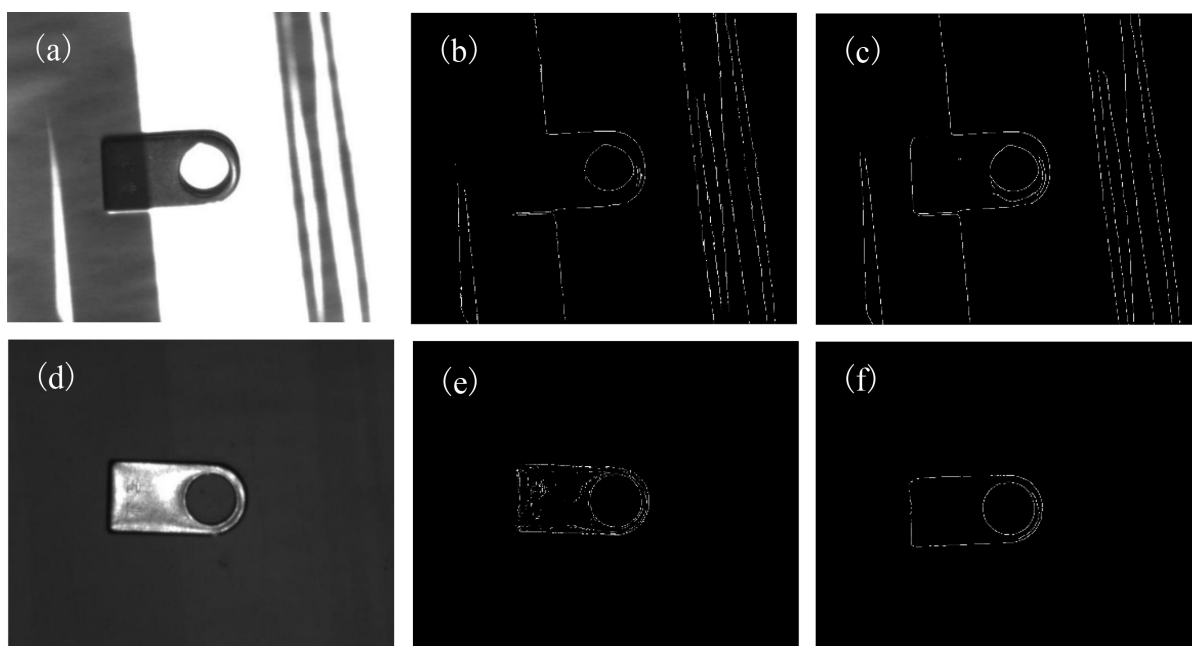


Figure 6. Image (a) of reflective objects before improvement; Image (d) after improvement. (b) and (c), and (e) and (f) are the Sobel and Canny edge extraction results of (a) and (d), respectively

图 6. 图(a) 反光物体改善前拍摄图像；图(d) 改善后拍摄图像；图(b)和(c)与(e)和(f)分别是(a)和(d)的 Sobel 和 Canny 算法边缘提取结果

Table 5. Comparison of experimental indicators for strong ambient light interference elimination

表 5. 强环境光干扰消除实验指标对比

材质	照明条件	背景灰度方差	伪边缘像素数量及全图占比	
			Sobel 算子	Canny 算子
生锈物体	改善前	13.83	9652 (1.15%)	6590 (0.79%)
	改善后	4.83	231 (0.03%)	339 (0.04%)
塑料物体	改善前	16.72	6989 (0.83%)	6247 (0.74%)
	改善后	5.89	89 (<0.01%)	78 (<0.01%)
反光物体	改善前	22.97	5855 (0.70%)	4547 (0.54%)
	改善后	3.58	16 (<0.01%)	44 (<0.01%)

如图 4 至图 6，引入本系统的软硬协同优化方案后，见表 5 成像改善效果在算法端得到了直接印证：三类材质的背景灰度方差呈断崖式下降。生锈、塑料及反光物体的方差分别降至 4.83、5.89 与 3.58。纯净平滑的底片从根本上阻断了环境伪梯度的滋生；干净背景允许算法采用更极致的阈值策略。对于对比度弱的塑料件，可采用低阈值高灵敏提取微弱边界；对于金属高光斑干扰，可采用高压阈值像手术刀般切除内部伪纹理；全图空间的非目标区域伪边缘像素占比被全面扼杀。在采用 Canny 算子时，塑料物体与反光物体的伪边缘像素占比均被压缩至<0.01%。算法能毫无迟疑地切分出连续、平滑且定位精准的单像素宽度真实物理轮廓。

5. 结论

本文面向非受控复杂工况下机器视觉特征提取所面临的严重光照畸变难题, 摒弃了传统的后端算法被动补偿范式, 创新性地提出了一套“近红外主动补光 + 窄带滤波 + 微秒级硬件同步”的软硬件协同视觉检测方法。全文的核心研究成果及主要贡献可归纳为以下三点: 构建了突破强杂散光干扰的光学物理隔离屏障。通过精细匹配 940 nm 中心波长的窄带干涉与微秒级高能瞬态照明, 系统在物理成像源头彻底阻断了由自然环境光及车间杂光引发的高光过曝与对比度塌陷, 打破了传统图像软件无法重构由于传感器感光超限而丢失底层几何信息的计算悖论; 确立了跨越不同非标准工业材质的自适应参数调优基准。依托涵盖信息熵、灰度标准差等指标的多维客观评价体系, 精准标定了反光金属的短曝压制溢出策略、生锈件的暗部纹理重构长曝策略, 以及塑料件的剥离伪对比度中等曝光策略, 成功实现了多材质目标成像质量的高保真统一, 消除了由材质反射差异带来的识别障碍; 验证了物理抗干扰前端对经典视觉算法的实质性增益。工程应用结果表明, 在强光直射的恶劣工况下, 优化后的纯净底片成功剔除了由阴影与镜面反射造成的破坏性伪梯度。Sobel 与 Canny 算子能够毫无迟疑地提取出连续、平滑且定位精准的单像素物理边缘, 非目标区域的伪边缘误检率被全面压缩至 0.01% 以下, 大幅拓宽了底层算法在恶劣工况下的应用边界。

参考文献

- [1] 周济. 智能制造是“中国制造 2025”主攻方向[J]. 企业观察家, 2019(11): 54-55.
- [2] 张文亮. 基于多曝光融合和 Faster R-CNN 的高反表面缺陷检测算法研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2024.
- [3] 李婷. 多曝光融合高动态范围图像的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京印刷学院, 2021.
- [4] 邢露. 多曝光融合图像质量评价方法研究[D]: [硕士学位论文]. 泉州: 华侨大学, 2018.
- [5] 张梅, 赵康威, 朱金辉. 联合多曝光融合和图像去模糊的深度学习[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(11): 4219-4228.
- [6] 中国标准化与信息分类编码研究所. GB/T 17683.1-1999 太阳能在地面不同接收条件下的太阳光谱辐照度标准第 1 部分: 大气质量 1.5 的法向直接日射辐照度和半球向日射辐照度[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [7] 张东亮, 张继军, 郝晓剑, 等. 基于 CMOS 相机的比色测温技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2025, 45(S1): 690-699.
- [8] 郭帅, 付东翔. 基于信息熵的光学成像系统分析[J]. 软件导刊, 2019, 18(1): 48-50.
- [9] 王克鸿, 游秋榕, 沈莹吉. 基于视觉的 MAG 焊气孔缺陷图像特征初步探讨[J]. 焊接学报, 2006(12): 13-16.
- [10] 赵英杉. 基于多尺度融合的水下图像清晰化研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- [11] 刁兴良, 张伟, 纪敏, 等. 光源工作距离变化对锯材表面节子图像的影响[J]. 林业工程学报, 2022, 7(6): 140-147.
- [12] 杨华. 基于 Sobel 算法的塑料袋边缘位置标定[J]. 包装工程, 2021, 42(23): 178-182.
- [13] Canny, J. (1986) A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8, 679-698. <https://doi.org/10.1109/tpami.1986.4767851>