

基于太阳光谱特性的近红外机器视觉检测方法

张艺^{1,2}, 戴洋¹, 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: 2025年8月22日; 录用日期: 2025年9月22日; 发布日期: 2025年9月30日

摘要

针对太阳光对机器视觉成像的干扰问题, 本文提出一种基于太阳光谱特性的近红外视觉检测方法。该方法依据大气在近红外波段对太阳光的吸收特性, 通过匹配特定波段的照明光源、窄带滤波片及工业相机, 有效抑制太阳光对成像系统的干扰。具体而言, 利用大气吸收作用降低工作波段内的太阳背景光, 并借助光学滤波阻断其它波段的太阳辐射, 从而提升成像质量与检测可靠性。实验表明, 在太阳直射条件下, 该方法能有效抑制光照不均与背景噪声, 获得轮廓清晰的目标图像。曝光时间分析进一步证明, 将曝光时间控制在1521 μs 以内, 太阳光干扰下成像的图像信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)可保持在20以上。本研究为复杂户外光照环境下实现稳定、低成本的机器视觉检测提供了一种有效的硬件解决方案。

关键词

机器视觉, 光学滤波, 近红外光源, 抗太阳光干扰

Near-Infrared Machine Vision Detection Method Based on Solar Spectral Characteristics

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

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

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

Received: August 22, 2025; accepted: September 22, 2025; published: September 30, 2025

Abstract

To address the interference of sunlight with machine vision imaging, this paper proposes a near-

*通讯作者。

文章引用: 张艺, 戴洋, 赵欣, 段智魁, 张海明. 基于太阳光谱特性的近红外机器视觉检测方法[J]. 应用物理, 2025, 15(10): 754-762. DOI: 10.12677/app.2025.1510079

infrared machine vision detection method based on the spectral characteristics of sunlight. By leveraging the absorption properties of the atmosphere in the near-infrared band, the method can effectively suppress the interference of sunlight on the imaging system through the careful selection of illumination sources, narrow-band optical filters, and industrial cameras operating in specific wavelengths. Specifically, it utilizes atmospheric absorption to reduce solar background noise within the working waveband, while employing optical filtering to block solar radiation in other bands, thereby improving imaging quality and detection reliability. Experiments demonstrate that under direct sunlight, this approach effectively mitigates uneven illumination and background noise, producing clear images with well-defined contours. The exposure time analysis provides further evidence that an image Signal-to-Noise Ratio (SNR) greater than 20 under sunlight interference can be achieved by controlling the exposure time within 1521 μs . This study provides an effective hardware-based solution for achieving stable and low-cost machine vision detection in complex outdoor lighting environments.

Keywords

Machine Vision, Optical Filtering, NIR Light Source, Sunlight Resistance

Copyright © 2025 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

当前，机器视觉检测技术已在工业检测、农业监测与安防监控等多个领域得到广泛应用[1]。随着其应用场景逐步扩展至户外环境，例如透明顶棚覆盖区域或海上作业平台，太阳光干扰日益成为影响视觉成像质量的关键因素。日照强度因目标位置、时段及天气条件的不同而发生显著波动，易导致图像过曝、细节缺失与对比度下降，使得目标特征被背景噪声淹没，严重影响检测可靠性[2]。

为应对上述问题，传统方法多采用物理遮蔽手段隔离环境光，以构建类似暗室的成像环境。然而，该类方法成本较高且安装灵活性不足，难以适用于大规模户外场景[3]。另一类方法通过亮度传感器获取环境照度信息，并借助控制算法调节光源的亮度，以部分补偿光照不均[4]-[6]。但其控制系统结构复杂，硬件成本较高，在视觉检测系统中的实际应用仍面临较大挑战。

此外，部分研究采用窄波段光源结合光学滤波的方式，以抑制太阳光中非目标波段的干扰。太阳辐射光谱覆盖范围广泛(约 300~2400 nm)，该方法通过滤光片仅允许特定窄带光进入相机，从而在一定程度上减弱背景光干扰。例如，倪菲等研究者基于近红外标记与光学滤波相结合的方法设计了吊具位姿视觉检测系统，以近红外发光灯作为标记，并利用红外滤光片屏蔽其它波段光线。实验表明，尽管引入滤光片，直射阳光仍对成像造成显著干扰[7]。茅时群等研究者基于激光三角测量法开发了集装箱自动对箱系统，采用波长 865 nm 的红外激光器与对应滤光片，虽可抑制多数干扰，但在该波段太阳辐射依然存在，目标激光条纹在强光条件下仍难以可靠提取[8]。

刘炜浩等研究者提出将逆反射材料与滤波技术相结合，采用 650 nm 光源并在相机端加装窄带滤光片。逆反射结构可使光线沿原路径返回，实验显示该方法能有效抑制太阳光干扰[9]。然而，逆反射材料仅适用于标定物，无法直接用于待测目标本身，限制了其应用范围。

既有研究皆未考虑太阳光经大气层衰减后的光谱特性。太阳辐射在穿过大气过程中会受气体分子与气溶胶的吸收、反射和散射作用，其光谱分布与强度会发生显著变化。尤其在部分近红外波段，水分子对太阳辐射具有强烈吸收作用，最高可衰减 70%以上。基于这一现象，本文提出一种抗太阳光干扰成像

方法：选取大气吸收显著的特定近红外波段作为照明波段，采用单色 LED 作为光源，并在工业相机前加装与之匹配的窄带滤光片。该结构可保证照明光线有效进入相机，同时大幅抑制其它波段的太阳辐射。通过结合大气自然衰减与光学滤波的双重作用，可显著削弱太阳光对成像系统的干扰。

2. 实验方法

2.1. 抗干扰波段选择

为确定太阳光具有大气强吸收特性的波段，先依据地面实测太阳光谱数据进行定量分析[10]。图 1 展示了 300~1600 nm 范围内地面接收到的太阳光谱辐照度分布。受大气中水分子振动 - 转动吸收机制的影响，太阳辐射在波长 940、1140 及 1380 nm 附近形成三个明显的吸收谷，其半高宽分别为 37、47 和 148 nm，均大于常用的 10 nm 窄带滤光片带宽。这些波段对应的最低太阳光谱辐照度依次为 258.3、108.9 和 1.6 W/m²/μm，显著低于太阳光在 480 nm 附近的峰值辐照度(1628.3 W/m²/μm)。上述吸收谷兼具较宽带宽与较低辐照度的特点，适用于本研究提出的抗太阳光干扰成像方法。

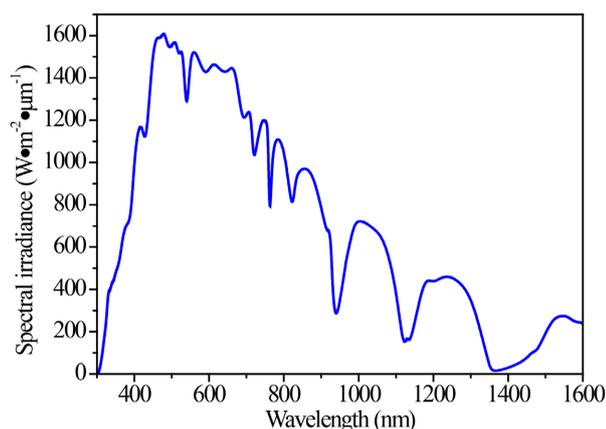


Figure 1. Ground-based measured solar spectral irradiance
图 1. 地面实测太阳光谱辐照度

2.2. 成像传感器适配性分析

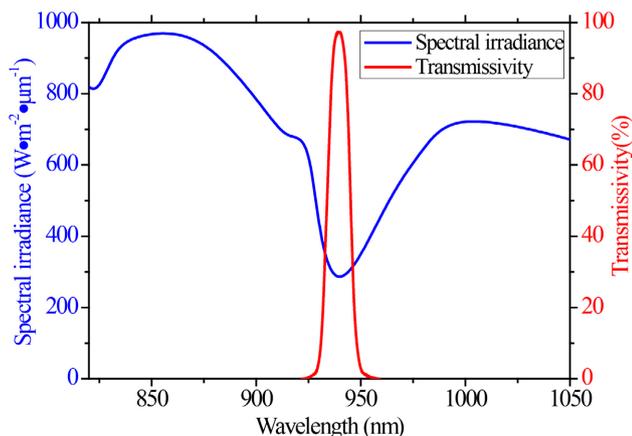


Figure 2. Transmission spectrum of the narrowband filter (red) and solar radiation spectrum near the 940 nm absorption valley (blue)
图 2. 窄带滤光片透射光谱(红)和波长 940 nm 吸收谷附近的太阳辐射光谱(蓝)

在确定研究波段时，还需考虑工业相机的光谱响应特性。目前广泛采用的硅基工业相机覆盖紫外至近红外波段，具有灵敏度高、性能稳定及成本较低的优势。然而受硅材料 1.1 eV 带隙宽度的限制，该类相机在波长大于 1100 nm 时量子效率显著下降至 10% 以下[11]，难以在该区域获得有效的图像信号。相比之下，碲镓汞相机带隙较低，在 900~1700 nm 波长范围内量子效率可保持在 70% 以上，表现出优异的灵敏度，但其价格较为昂贵[12]。基于性能与成本的综合考量，本研究选用硅基工业相机，并将其与太阳光谱在 940 nm 附近的吸收谷进行匹配，开展抗阳光干扰成像研究。实验中选择中心波长为 940 nm，带宽 10 nm 的窄带滤光片，其透射波段恰好完全落入 940 nm 附近太阳光谱的吸收谷内，如图 2 所示。

2.3. 实验系统

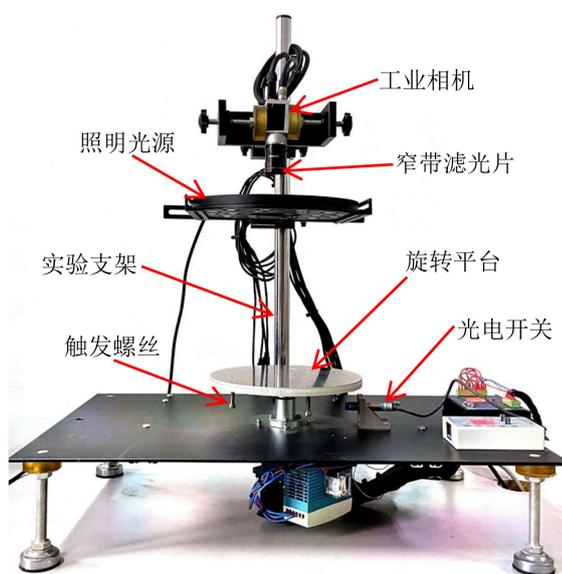


Figure 3. Experimental system
图 3. 实验系统

实验系统结构如图 3 所示，主要包括工业相机、窄带滤光片、照明光源、旋转平台、光电开关及触发螺丝。所选用的海康 MV-CA013-20GN 近红外增强工业相机，在可见光至 1100 nm 波段具有高灵敏度，能有效捕获该范围内的微弱光信号。实验过程中，相机增益保持为 1 不变。相机上安装海康 FA 系列工业镜头，其靶面尺寸为 1/1.8 英寸，焦距为 8 mm，并具备 F2.8 至 F16 的可调光圈范围。镜头与旋转平台之间的垂直距离为 30 cm。照明光源采用中心波长 940 nm、半高宽 10 nm 的 LED，与滤光片参数一致，最大功率 150 W，亮度可通过控制器连续调节。旋转平台由电机驱动运行，其底面均匀安装有四颗触发螺丝。当螺丝随平台转至光电开关感应区时，将遮挡光路，引起光电开关状态跳变并产生触发信号。该信号同步控制光源瞬时点亮与相机曝光采集，确保在指定位置处同步获取光照一致的图像。旋转平台每转动一周，可采集检测对象在四个不同位置处的图像。整个系统通过与计算机连接，依托天津普达软件技术有限公司开发的 Smart Vision 视觉检测系统软件平台，可实现图像处理与目标检测功能。

3. 实验结果与分析

为评估系统在强太阳光环境下的抗干扰性能，在晴朗天气下的中午时间，将实验平台置于户外阳光直射下开展实验，并与普通光源条件下的成像效果进行对比。每组实验采集四幅图像，对应旋转平台转动一周时工件处于四个不同位置的情形。检测对象为一带平行条纹的方形铝件，中心设有一个圆孔。

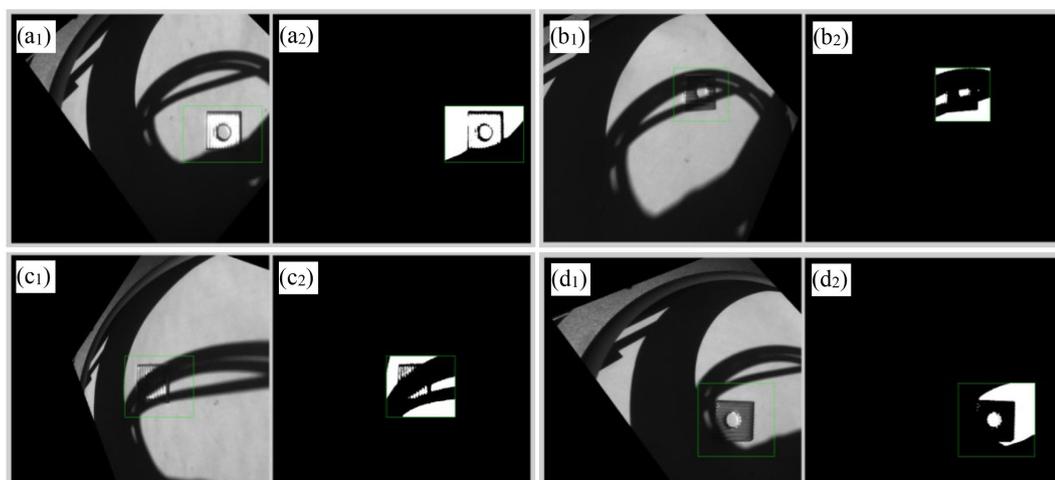


Figure 4. Workpiece images under ordinary light source illumination without filtering ($a_1\sim d_1$) and their optimal binarization results ($a_2\sim d_2$)

图 4. 普通光源照射且无滤光情况下工件成像图($a_1\sim d_1$)及最优二值化图($a_2\sim d_2$)

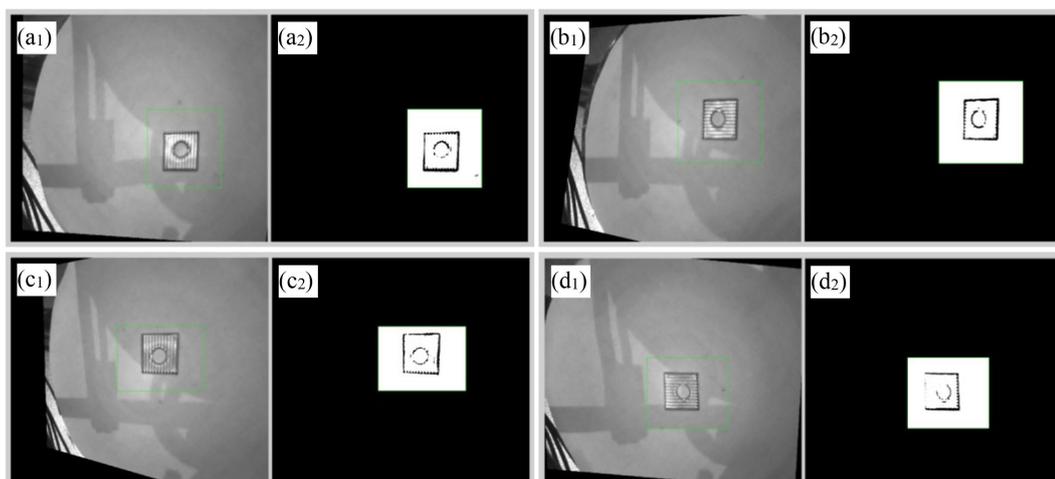


Figure 5. Workpiece images under 940 nm wavelength infrared illumination with filtering ($a_1\sim d_1$) and their optimal binarization results ($a_2\sim d_2$)

图 5. 波长 940 nm 红外光源照射并滤光情况下工件成像图($a_1\sim d_1$)及最优二值化图($a_2\sim d_2$)

图 4(a1)~(d1)展示了普通光源照射且无滤光情况下的工件成像图。实验所用普通光源功率 20 W，光谱范围为 620 nm 到 630 nm。在不进行滤光的情况下，太阳光强度远高于实验所用光源，照明信号完全被太阳辐射淹没。为避免图像过曝，将相机光圈设为 F16，并将曝光时间减小到 441 μs 。图像中明亮区域为太阳直射处，暗区则为周围环境遮挡所形成的阴影。从图中可以看出，随着工件位置改变，其被阴影遮蔽的区域也相应变化。图 4(a2~d2)显示了对应图像工件在灰度阈值为 150 时的最优二值化结果，在该条件下无法提取完整的工件轮廓。

图 5(a1)~(d1)展示了波长 940 nm 红外光源照射并滤光情况下工件成像图。为保障充足的进光量，我们将光圈设定为 F2.8，并选择了 1024 μs 的曝光时间以实现最佳的图像信噪比。与图 4 中各图相比，该组图像中的阴影区域明显减淡，整体光照分布更为均匀。图 5(a2)~(d2)为对应图像中工件在灰度阈值为 120 时的最优二值化结果。经二值化处理后，阴影干扰被完全消除，工件轮廓清晰呈现，具备良好的可识别性。

相机曝光时间是决定成像亮度与动态表现的关键参数。较长的曝光时间可增加进光量，提升图像整体亮度，但也容易因目标或相机相对运动而产生运动模糊；较短的曝光时间虽可清晰捕捉动态目标，但进光量减少易导致图像偏暗。在相机前加装中心波长为 940 nm 的窄带滤光片后，由于该波段太阳辐射强度显著衰减，若不开启照明光源，图像亮度将主要受曝光时间控制。

图 6(a)~(i)展示了滤光且不加光源情况下，相机曝光时间分别为 529、1024、1521、2025、3025、4096、6084、8100 和 10,000 μs 时拍摄的太阳光背景图像，实验中光圈值保持为 F2.8。图像中明亮区域对应太阳直射处，暗区则为周围遮挡形成的阴影。由于 940 nm 附近太阳辐射本已较弱，在较短曝光时间下，如图 6(a-c)，即便是直射区域也显得十分暗淡。随着曝光时间延长，相机累计接收的光子数量增加，图像中明暗对比逐渐增强；当曝光时间增至 10,000 μs 时，如图 6(i)，直射区与阴影区已清晰可辨。

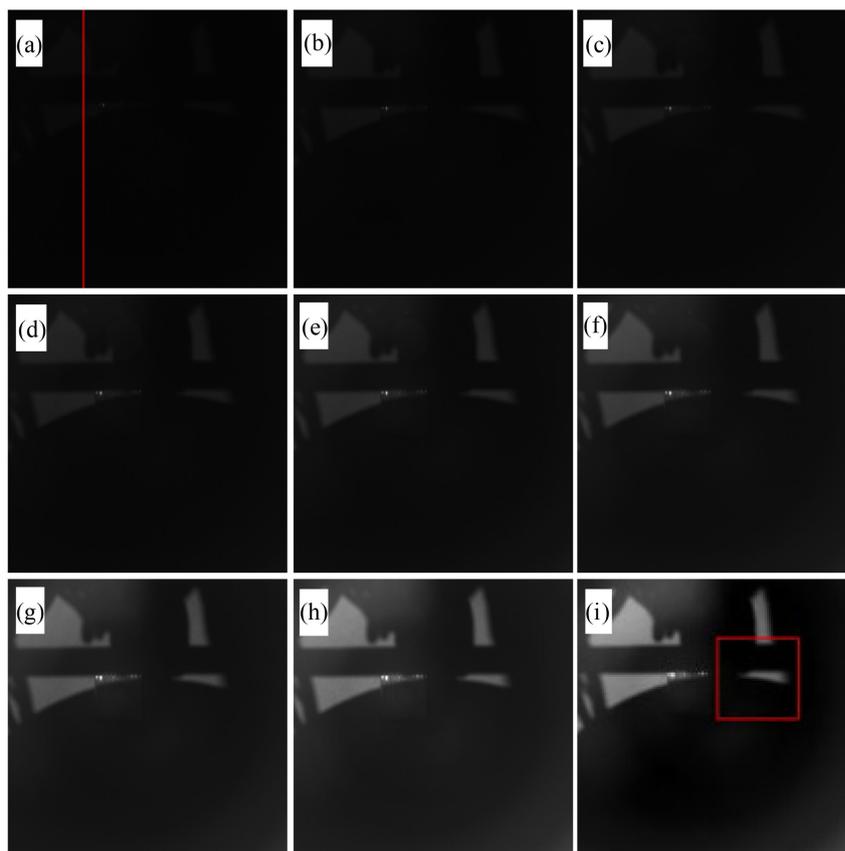


Figure 6. Solar background images with filtering and without additional light source, at exposure times of 529, 1024, 1521, 2025, 3025, 4096, 6084, 8100, and 10,000 μs respectively

图 6. 滤光且不加光源情况下，曝光时间分别为 529、1024、1521、2025、3025、4096、6084、8100 和 10,000 μs 时的太阳光背景成像图

为定量分析太阳辐射强度随曝光时间的变化，图 7(a)~(i)提取了图 6 各图像沿纵轴的灰度值分布，该轴的位置如图 6(a)中的红线所示。图中波峰对应太阳直射区域，其余部分为阴影，这种因光照不均所引起的灰度差异构成了太阳光对成像的主要干扰。波峰灰度值越低，代表干扰越小。各图像中的最大波峰灰度值依次为 12、20、26、35、48、62、94、124 和 152，太阳光干扰随着曝光时间逐渐增加。从图 6 各子图中提取同时包含阳光直射与阴影的背景区域(具体位置见图 6(i)红框标注)，并统计该区域的灰度值。分别计算灰度值的均值与标准差，以均值与标准差的比值作为阳光干扰引起的图像信噪比(Signal-to-Noise

Ratio, SNR)。结果表明, 随曝光时间增加, SNR 逐渐下降, 具体数值依次为 4.34、3.09、2.76、2.51、2.26、2.10、1.96、1.90 和 1.88。由于未使用外加光源, 成像环境光照较弱, 因此整体信噪比普遍较低。

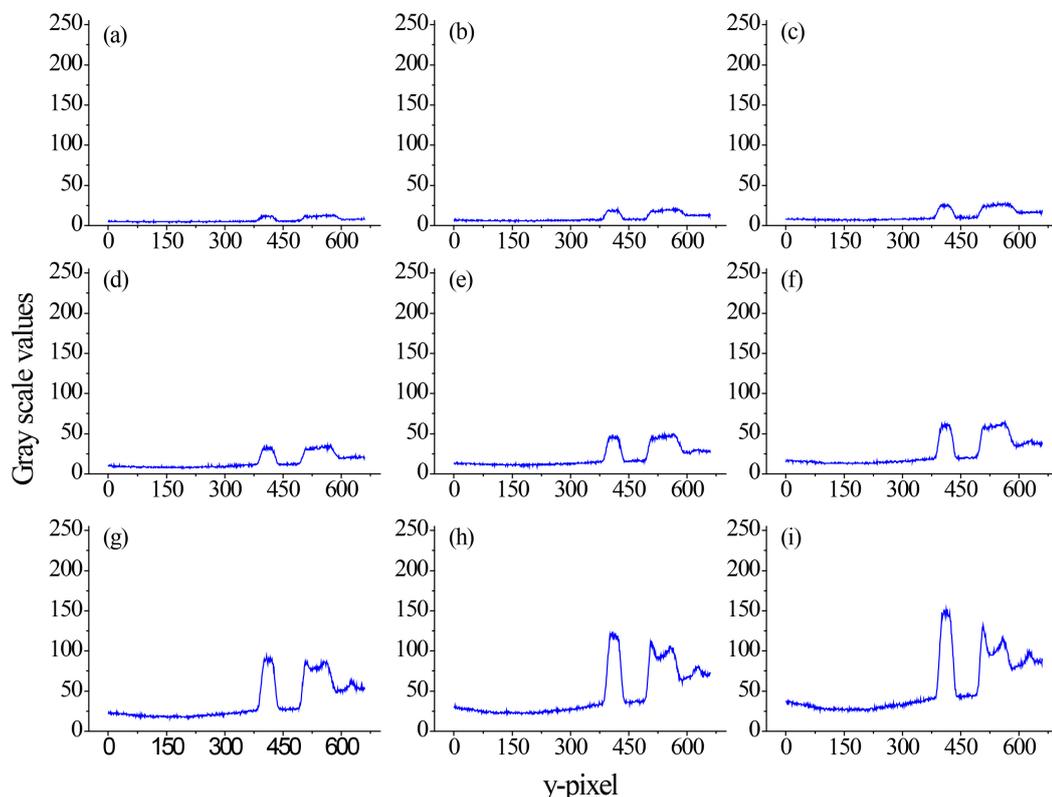


Figure 7. Gray-value distribution along the vertical axis for the images in Figure 6. The location of the axis is shown by the red line in Figure 6(a)

图 7. 图 6 中图像沿纵轴的灰度值分布, 该轴的位置如图 6(a)中的红线所示

图 8(a)~(i)展示了波长 940 nm 光源照射且滤光情况下, 不同曝光时间所对应的成像效果, 实验中光圈值保持为 F2.8。所采用的曝光时间与图 6 保持一致, 分别为 529、1024、1521、2025、3025、4096、6084、8100 和 10,000 μs , 对应的照明光源功率依次为 150、150、88、65、47、41、29、24 和 18 W。当曝光时间为最短的 529 μs 时, 即使光源功率已达到 150 W, 图像整体亮度仍显不足; 而当曝光时间延长至 1024 μs 并保持 150 W 功率时, 图像亮度趋于适宜水平。继续增加曝光时间则需相应降低光源功率, 以防止图像过曝。实验表明, 较短的曝光时间有利于抑制阳光干扰并提升图像质量, 但需配合较高的照明功率。若曝光时间低于 1000 μs , 则需使用功率高于 150 W 的光源, 否则图像亮度过低将影响成像效果。

图 9(a)~(i)展示了图 8 中图像沿纵轴的灰度值分布, 该轴的位置如图 8(a)中的红线所示。由于各图像整体亮度存在差异, 为便于比较, 将所有曲线的灰度值以图 9(i)中第一个点的灰度值 88 为基准进行了平移校正。分析结果表明, 当曝光时间不超过 1521 μs 时, 该位置灰度分布基本一致, 太阳光所产生的噪声被照明光源信号有效掩盖, 如图 9(a)~(c)所示。随着曝光时间进一步增加, 太阳辐射所引起的噪声逐渐增强。当曝光时间达到 10,000 μs 时, 阳光直射区域灰度值超过 200, 如此强的太阳光噪声将严重影响机器视觉成像效果。同样, 提取图 8 各子图中背景区域(位置见图 8(i)红框标注)的灰度值, 并计算其 SNR 数值。结果表明, 各图的 SNR 依次为 20.60、20.58、20.41、19.98、18.31、16.95、12.57、9.30 和 5.65。在附加照明光源的条件下, 系统信噪比显著提升。当曝光时间不超过 1521 μs 时, SNR 可维持在 20 以上。

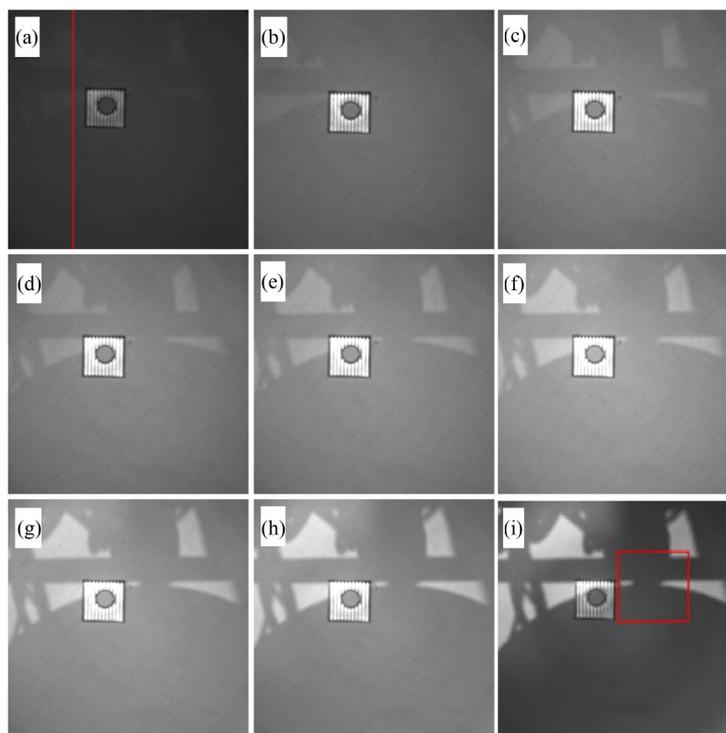


Figure 8. Workpiece images under 940 nm wavelength illumination with filtering, at exposure times of 529, 1024, 1521, 2025, 3025, 4096, 6084, 8100, and 10,000 μs , with light source power of 150, 150, 88, 65, 47, 41, 29, 24, and 18 W respectively

图 8. 波长 940 nm 光源照射且滤光情况下, 曝光时间分别为 529、1024、1521、2025、3025、4096、6084、8100 和 10,000 μs 时的工件成像图, 光源功率分别为 150、150、88、65、47、41、29、24 和 18 W

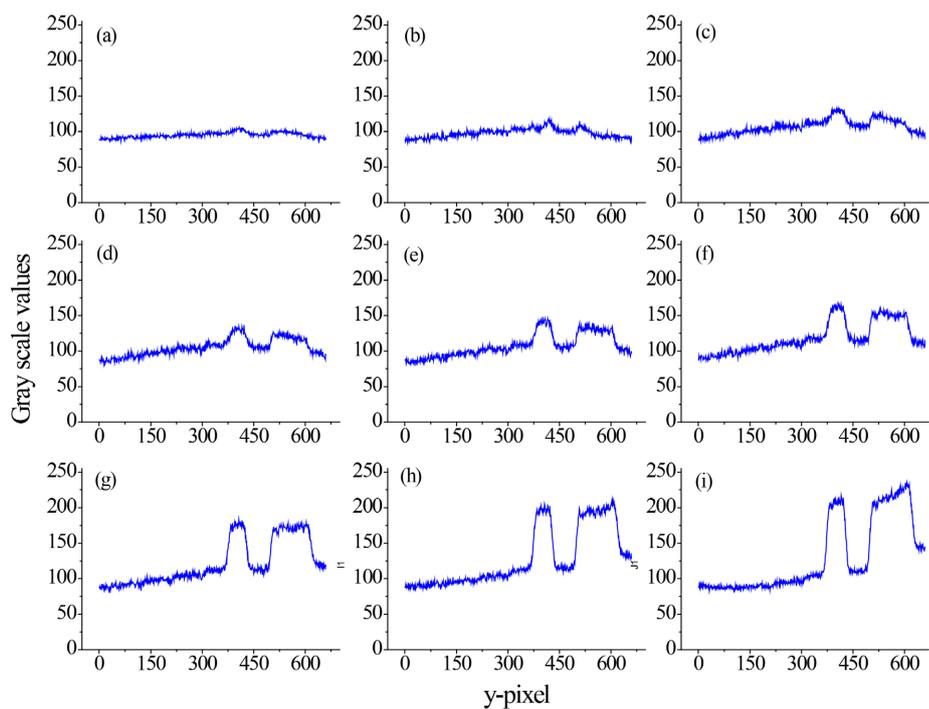


Figure 9. Gray-value distribution along the vertical axis for the images in Figure 8. The location of the axis is shown by the red line in Figure 8(a)

图 9. 图 8 中图像沿纵轴的灰度值分布, 该轴的位置如图 8(a) 中的红线所示

4. 讨论

实验结果表明, 缩短曝光时间可有效降低相机接收到的太阳光信号, 从而减弱阳光干扰。然而, 曝光时间减少也会导致照明光源的信号强度下降。为保证成像质量, 需相应提高光源功率。在本实验中, 所使用的光源最大功率为 150 W。当曝光时间降至 529 μs 时, 虽光照强度已明显不足, 但图像 SNR 仍可维持在 20 以上。若采用功率更强的光源并进一步缩短曝光时间, 图像信噪比有望继续提升。然而, 提高光源功率将导致系统发热增加, 需配套更高效的散热装置, 从而增加系统成本。因此, 在实际应用中, 需综合考虑曝光时间、光源功率与散热成本之间的平衡关系。其次, 光源照明效果与打光方式及工作距离密切相关。实验中所设计的光源在 60 cm 工作距离内, 可在直径 40 cm 的范围内实现均匀的光强分布。实际应用中, 应根据具体照射范围与距离, 设计相应的照明方案。此外, 滤波波段所受到的太阳光干扰与成像时的大气条件密切相关。本研究在晴朗中午阳光强烈的条件下完成实验, 成像结果经二值化处理后可完全抑制太阳光干扰噪声, 清晰提取工件轮廓。未来可在阴天、不同湿度等多种天气条件下开展进一步实验, 并针对不同材质与颜色的样本进行验证, 以考察该方法的普适性与稳定性。

5. 结论

本文针对户外机器视觉系统在太阳光干扰下成像质量下降的问题, 提出一种结合太阳光大气吸收特性与光学滤波的抗干扰成像方法。该方法基于大气中水分子对太阳辐射的吸收特性以及硅基工业相机的光谱响应特性, 选取 940 nm 波段作为成像中心波长, 开展抗太阳光干扰成像研究。实验结果表明, 在普通光源照明且无滤光片的情况下, 太阳光噪声极为强烈, 工件信息完全被淹没, 即使经过最优二值化处理仍无法提取完整的工件轮廓。而在 940 nm 红外光源配合相应滤光片的成像条件下, 太阳光噪声显著减弱, 图像经二值化处理后可完全消除阴影干扰, 清晰呈现工件轮廓, 具备优良的可识别性。曝光时间分析显示, 太阳干扰信号随曝光时间增加而增强。将曝光时间控制在 1521 μs 以内, 太阳光噪声的信号基本被照明光源所掩盖, 图像的 SNR 可维持在 20 以上。本研究为户外复杂光照环境下实现稳定、低成本的机器视觉检测提供了一种可行的硬件解决方案, 尤其适用于需长期户外作业的工业检测与环境监测应用。

参考文献

- [1] Tzampazaki, M., Zografos, C., Vrochidou, E. and Papakostas, G.A. (2024) Machine Vision—Moving from Industry 4.0 to Industry 5.0. *Applied Sciences*, **14**, Article No. 1471. <https://doi.org/10.3390/app14041471>
- [2] 陈永刚, 李国臣, 李坛珂, 等. 一种改进的偏振光源在机器视觉中的应用[J]. 机床与液压, 2020, 48(23): 60-63.
- [3] 巢渊, 徐鹏, 唐寒冰, 等. 视觉检测系统 LED 光源照度优化方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(12): 347-358.
- [4] Liu, H., Zhou, Q., Yang, J., Jiang, T., Liu, Z. and Li, J. (2017) Intelligent Luminance Control of Lighting Systems Based on Imaging Sensor Feedback. *Sensors*, **17**, Article No. 321. <https://doi.org/10.3390/s17020321>
- [5] 孙志强, 寇山川, 侯靖轩, 等. 视觉检测的 LED 光源自适应亮度控制系统[J]. 办公自动化, 2020, 25(1): 44-45.
- [6] 邢丽冬, 钱志余, 钱露, 等. 基于图像跟踪的 LED 无影灯自动调光方法的研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(8): 923-927.
- [7] 倪菲, 茅时群, 费国, 等. 基于机器视觉的吊具位姿检测系统[J]. 起重运输机械, 2011(10): 43-47.
- [8] 茅时群, 蒋进军, 陈江波. 基于激光三角测量法的集装箱自动对箱系统[J]. 港口科技, 2016(2): 26-31.
- [9] 刘炜浩, 陶卫, 赵辉. 基于定向照明及逆反射技术的太阳光干扰抑制方法研究[J]. 光学技术, 2011, 37(2): 230-234.
- [10] SJ/T 10174-91, 《AM0、AM1.5 太阳光谱辐照度标准》[S]. 北京: 中华人民共和国机械电子工业部, 1991.
- [11] 贺亦菲, 杨德仁, 皮孝东. 基于硅/二维层状材料异质结的红外光电探测器研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(1): 5-13.
- [12] 陈洁, 朱尤攀, 孙爱平, 等. 基于大面阵镉汞砷探测器的短波红外光学系统设计[J]. 红外技术, 2025, 47(6): 689-695.