

表面疵病动态彩色编码融合成像检测技术

缪 洁^{1,2}, 李 展², 崔子健², 刘德安¹, 朱健强¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 表面微小疵病在用不同波长的光照明时,其光学图像会存在不同程度的非线性放大畸变现象,对成像信息中的目标提取和信噪比(SNR)将产生一定的影响。提出利用红、绿、蓝三基色光源辐照下的疵病图像进行动态彩色编码成像的方法,经像素级图像融合后可实现高冗余信息的图像合成,从而在获取表面微小疵病丰富细节的同时可进一步提高信噪比。分析了针对三基色图像进行彩色编码的理论,提出了基于图像梯度的动态权值融合成像方法,同时给出了光谱非线性放大信号的噪声分析模型,通过理论分析和数值模拟两方面,充分验证了动态权值融合降低标准偏差的有效性。在明场表面疵病成像实验中,采用三基色平衡响应的彩色互补金属氧化物半导体(CMOS)相机,分别获取了单个微米量级表面疵病点的三基色滤波图像,并通过与传统边缘提取、非动态权值组合等方法的结果比对,验证该优化方法可得到一幅细节更为丰富的高 SNR 图像。在暗场表面疵病成像实验中,以图像灰度平均梯度和提取到的疵病数量为评价参数,即从优化图像质量和疵病识别能力两个方面,进一步验证该优化在高保真和低噪声方面的有效性。提出的动态彩色编码融合成像方法可有效降低光谱非线性放大带来的噪声。

关键词 光学器件; 表面疵病; 动态彩色编码; 高功率激光技术

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0912002

Dynamic Spectral Coding Fusion Imaging Detection Technique of Surface Defects

Miao Jie^{1,2}, Li Zhan², Cui Zijian², Liu Dean¹, Zhu Jianqiang¹

¹Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

Abstract When the surface tiny defects are illuminated by the light with different wavelengths, their optical image exist nonlinear and amplified distortion phenomenon with different degrees. It has certain effects on target extraction and signal-to-noise ratio (SNR) of the imaging information. An approach that defect image illuminated by red, green, and blue light source is used for dynamic spectral coding imaging is proposed. The image synthesis with high redundancy can be realized through pixel-level image fusion. Then it can further enhance SNR while fetching rich details of micro defects on the surface. The spectral coding theory is analyzed based on three-primary-color images, and then the dynamic weight fusion imaging method is proposed based on the image gradient. The corresponding noise analysis model of spectral nonlinear amplified signal is given. The effectiveness of dynamic weight fusion reducing standard deviation is fully verified by both theoretical analysis and numerical simulation. In the bright field surface defect imaging experiment, color complementary metal oxide silicon (CMOS) camera of three-primary-color equilibrium response is adopted to obtain three-primary-color filtering image of single micron-size defect point on the surface. By comparing with the results of traditional edge extraction, non-dynamic weight combination, and other methods, it is proved that the proposed optimization method can get a high SNR image with richer details. In the dark

收稿日期: 2017-03-31; **收到修改稿日期:** 2017-05-10

作者简介: 缪 洁(1982—),女,博士研究生,高级工程师,主要从事高功率激光元件光学检测方面的研究。

E-mail: miaojie@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—),男,博士,研究员,主要从事高功率激光技术等方面的研究。

E-mail: jqzhu@siom.ac.cn(通信联系人)

field surface defect imaging experiment, image gray level mean gradient and extracted defect quantity as evaluation parameters, namely two aspects of optimizing image quality and defect recognition ability, are used to further verify the effectiveness of high fidelity and low noise. The study of this dynamic spectral coding fusion imaging method can effectively reduce the noises from spectral nonlinear amplification.

Key words optical devices; surface defects; dynamic spectral coding; high power laser technology

OCIS codes 230.0250120.3940; 240.6700; 300.6490; 160.3380

1 引 言

高质量的光学元器件是高功率激光驱动器的主要组成部分之一,其表面疵病特性将直接影响到激光系统的能量负载能力。因此,在光学材料生长、加工处理和光学检测等过程中,光学元器件的表面疵病特性成为重点关注和分析的对象^[1-7]。传统的显微镜放大成像主要适用于小尺寸范围的检测,而线阵扫描子孔径拼接等技术也有其局限性,二维快速高分辨率的大口径表面疵病检测与分析技术在高性能激光元器件研制的全周期过程中具有重要应用^[1-5]。美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室在研制国家点火装置(NIF)过程中研究发展了两代大口径光学元器件表面缺陷二维成像系统^[1-3],为高性能 NIF 激光装置的成功研制发挥了重要作用^[7]。尽管上述技术取得了较好的实际应用,但针对高精度大口径表面疵病的检测需求,该技术在关键环节方面仍存在很大的发展空间。无论是明场成像还是暗场成像,其关键环节均是对表面疵病实现高保真高信噪比成像,这就要求在保证微小疵病成像边界清晰的前提下,同时尽量降低吸收和散射过程中的杂散噪声。而影响这些关键环节的因素除了成像系统固有性能外,不同波长照明下由光谱效应导致的微小疵病的成像非线性放大畸变问题^[8]是容易被忽视的重要因素。因此,若能解决照明光对检测图像产生的光谱效应影响,并对高功率激光系统中元件表面微小疵病实现边界清晰的低噪声成像,将具有重要意义。

针对上述问题,本文提出了一种基于三基色图像的动态彩色编码高信噪比成像及优化方法。一方面,采用彩色感光元器件替代传统的黑白感光元器件,通过对比三基色图像以及图像融合的细节差异,分析照明光谱与表面疵病散射图案的特征关联,将光谱信息融合到表面疵病二维检测系统中,进一步增加检测图像的信息维度;另一方面,根据不同的检测对象和环境,动态调整融合的权值分配,有望获得表面微小疵病的高保真和高信噪比图像,提升光学元件的检测效果。为阐述这种成像方法的可行性,本文首先分析三基色图像彩色编码理论,建立光谱非线性放大噪声模型,分析基于表面疵病图像梯度的动态权值计算融合成像方法及提高信噪比的依据,然后分别通过单个损伤点的显微明场成像和中等口径元件的暗场成像两组对象进行动态图像融合实验验证。在融合成像验证实验中,采用三基色平衡响应的彩色互补金属氧化物半导体(CMOS),分别获取待测样品中表面疵病的红、绿、蓝三幅图像,根据三幅图像的灰度梯度进行融合权值优化,融合成为一幅细节丰富的高信噪比图像。

2 动态彩色编码融合成像设计原理

在高功率激光驱动器系统的应用中,光学元器件的表面疵病的特性将直接影响到激光系统的能量输出和负载能力,国内外大量文献对疵病的尺寸和分布统计等方面的特性进行了深入的分析研究^[9-11]。由于在高功率激光传输过程中,空间调制的频率与非线性增长密切相关^[12-14],因此不同尺度的疵病对光束的调制特性和对后续激光链路光损伤的影响等均有差异。在实际应用中,不同的研究对象对光学检测的测量量级关注点有所不同:在材料生长阶段,以几十微米以下的特征尺寸为重要分析对象;在光学加工阶段,对长度在毫米以上的划痕比较关注;而在激光系统应用分析阶段,对几微米到百微米量级的疵病尺寸较为敏感,根据高功率激光非线性传输理论分析^[15],该尺寸范围的疵病容易产生强烈的非线性调制增长,在米量级的传输距离内即可产生自聚焦等光损伤破坏点,是高功率激光系统中关注的重点对象。

在现有报道的表面疵病检测技术中^[1-8],一般采用单一波长、白光或者中红外光进行照明成像,而在高功率激光系统中最为关注的微米量级疵病检测中,这类传统照明方式存在噪声过大或者丢失局部细节的问题。这是由于表面微小疵病在不同波长照明时,存在不同程度的非线性放大畸变现象,会给表面疵病检测带来很大误检率,不利于高功率激光链路中光损伤的有效控制。

2.1 动态彩色编码图像融合方法

充分利用彩色感光元器件的三基色成像原理,通过获取与彩色感光元器件成像相同的红、绿、蓝三基色图像,对获取图像的灰度梯度进行动态权值优化,实现信息更加丰富的像素图像融合,从而对目标的表征更为精确,更利于后续的图像处理和识别。

图像融合技术有像素级别、特征级别和决策级别等方法^[16],针对高功率激光光学元件的表面缺陷成像问题,为实现微米量级图像的精确编码合成,一般采用高精度的像素级别图像融合。其主要流程是在对三基色图像对应的每个像素进行严格配准后,对三基色图像的单个像素以一定的灰度梯度边界条件进行权值分配和融合合成计算,其主要算法流程如图 1 所示。

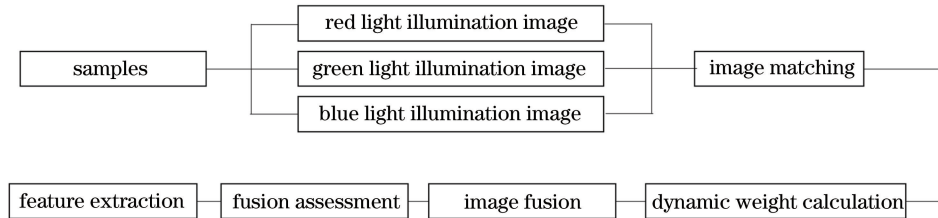


图 1 动态彩色编码图像融合主要流程示意图

Fig. 1 Main flow chart of dynamic spectral coding image fusion

设参与图像编码融合的三个单色图像灰度矩阵分别为 \mathbf{A}_1 、 \mathbf{A}_2 、 \mathbf{A}_3 , CMOS 像素为 $I \text{ pixel} \times J \text{ pixel}$, 经融合后得到的图像融合为 \mathbf{F} , 因此利用 \mathbf{A}_1 、 \mathbf{A}_2 、 \mathbf{A}_3 三个原图像的像素灰度值实现图像融合后的对应像素灰度表达式为

$$\mathbf{F}(i, j) = f_1 \mathbf{A}_1(i, j) + f_2 \mathbf{A}_2(i, j) + f_3 \mathbf{A}_3(i, j), \quad (1)$$

式中 i 为图像中像素点的行号, $i = 1, 2, \dots, I$; j 为图像中像素点的列号, $j = 1, 2, \dots, J$; f_1, f_2 和 f_3 分别对应红光、绿光和蓝光单色图像的加权系数; 通常 $f_1 + f_2 + f_3 = 1$ 。

对于权值的选取, 如果人为地给定会加入很多主观因素, 同时由于接收感光元器件的信噪比与光强等各种因素有关, 疵病区域和光滑表面区的灰度值将存在非线性变化关系。因此, 若简单地对整幅图像进行加权像素融合, 会导致噪声也被放大, 并会削弱实际关注的疵病边界形貌细节。

考虑到表面疵病检测主要是在大面积平坦图像区域中提取微小疵病信息, 而图像的梯度反映相邻像素间灰度值的变化^[17], 对于检测图像中的细节部分具有重要意义, 特别适用于疵病检测技术。针对上文提出的噪声放大问题, 本文提出了基于表面疵病图像梯度的动态权值计算方法。在图像梯度加权融合过程中, 对于单个通道图像 \mathbf{A}_n , 其梯度定义为

$$g_n(i, j) = [\mathbf{A}_n(i + 1, j) - \mathbf{A}_n(i - 1, j)] \cdot i + [\mathbf{A}_n(i, j + 1) - \mathbf{A}_n(i, j - 1)] \cdot j, \quad (2)$$

式中 $n = 1, 2, 3$, 对应的 $g_n(i, j)$ 分别为红、绿、蓝单色照明下获得的图像在像素 (i, j) 处的梯度函数。设定某一梯度函数评价值为 ϵ , 若 $\sum |g_n(i, j)| > \epsilon$, 则在像素 (i, j) 处对应的加权系数为

$$f_n(i, j) = \frac{|g_n(i, j)|}{\sum |g_n(i, j)|}, \quad (3)$$

否则在像素 (i, j) 处加权系数为

$$f_n(i, j) = \frac{1}{3}, \quad (4)$$

ϵ 根据成像噪声大小进行取值。实际应用中, 一旦根据某一特定成像性能选定合适的梯度函数评价值 ϵ , 计算程序将自动对每个像素进行权值分配与融合, 直至完成整幅图像的动态权值融合。这种像素级的动态权值计算, 避免仅在其中一个通道出现细节时, 由于加权平均而被衰减, 能够最大限度地保留图像细节; 同时 ϵ 的选取又可以保证由光谱响应特性造成的部分噪声或随机噪声不被放大, 能够适应各种成像条件下的三基色图像融合。

2.2 光谱非线性放大噪声模型与图像融合标准偏差分析

上述基于梯度函数的动态权值像素级融合算法, 为表面疵病的提取提供了新的优化途径, 是抑制微小表

面疵病照明光谱效应产生的非线性噪声的一种重要手段。如何评价这种动态图像融合的优化效果是实际应用中值得关注的研究内容。本文结合算法特点和表面疵病成像需求,分别从图像随机噪声和照明光源产生的光谱非线性放大噪声两个角度,理论分析了图像融合后的优化效果与适用范围。

假设获得的上一节所述的三个单色图像 A_n , 分别包含真实灰度图像 D 和噪声图像 η_n , 则在像素点 (i, j) 处测得的灰度值可以表示为

$$A_n(i, j) = S_n D(i, j) + E_n \eta_n(i, j), \quad (5)$$

式中 $D(i, j)$ 为像素点 (i, j) 处的真实图像灰度值, $\eta_n(i, j)$ 为该处的噪声, 并假设其为不相关、零均值随机噪声。当考虑照明光源产生的光谱非线性放大效应时, S_n 为真实灰度图像 $D(i, j)$ 产生的光谱非线性放大系数, E_n 为非线性噪声放大系数。

一般来说, S_n 与所用感光元器件在对应波段的响应系数成线性关系, 且为一个常量。特别地, 当感光元器件选择在对应该波长的响应系数近似相等的情况下(见下文详细描述), $S_1 \approx S_2 \approx S_3$ 。对上述表达式归一化为

$$A'_n(i, j) = D(i, j) + K_n(i, j), \quad (6)$$

式中 $K_n(i, j) = E_n / [S_n \eta_n(i, j)]$, 当忽略非线性放大效应时 $S_n = E_n$, 即简化为传统噪声模型。

经图像权值融合后的归一化像素灰度值表达式为

$$\bar{A}(i, j) = D(i, j) + \sum_{n=1}^3 f_n(i, j) K_n(i, j). \quad (7)$$

根据上一节所述, 当处于不存在疵病的平坦图像区域由于光谱非线性效应造成三幅图像其中一幅有突发噪声, 即 K_1, K_2, K_3 中任意一个值较大时, 由于该像素的梯度函数求和 $\sum |g_n(i, j)| \leq \epsilon$, 则噪声将被均值化而趋于零, 因此合适的梯度函数评价值可有效匀滑虚假信号单值突变。

当处于真实疵病区域时, 基于多波长下取样和经验模型下获取的梯度函数评价值 ϵ , 即使其中一个波段图像无响应, 仍能使 $\sum |g_n(i, j)| > \epsilon$, 同时无响应的失真图像像素对应的梯度 $|g_n(i, j)|$ 和动态权值

$f_n(i, j)$ 也为一小量, 极大地减少了个别光谱响应度问题造成的漏检和误差。因此, 上述理论分析可以有效抑制光谱非线性放大引起的噪声。

为了较为直观地给出权值分配图像融合后噪声的标准偏差, 基于上述噪声模型进行模拟量化分析。假设随机噪声为零均值且与被测样品非相关, 因此可忽略真实图像的灰度值变化, 即设 $D(i, j) = 0$ 。观察单一权值变化下(即 $f_2 = f_3$ 前提下, f_1 从 0 递增至 1)图像融合的标准差。如图 2 所示有两种情况: 1) 单个基色图像有较大的光谱非线性放大噪声, 标准差分别设置为 $\sigma_1 = 0.20, \sigma_2 = \sigma_3 = 0.02$, 模拟其随机噪声; 2) 三幅图像的噪声程度比较接近时, 假设叠加上方差均为 0.10 的随机噪声。由图 2 可以看出, 当 f_1 从 0 递增至 1, 两种情况下融合后图像噪声标准差均比原始图像的标准差小。由此可见, 通过调整权值使融合后的噪声趋于更低是可行的。通过两种条件下的模拟结果对比, 还可以看出均值融合仅适用于三幅图像噪声接近的情况, 而通常情况下三幅图像的噪声情况是有较大差异的。

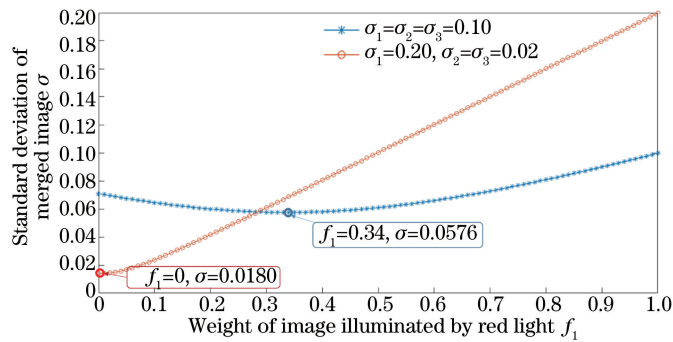


图 2 不同光谱非线性放大噪声情况下的权值分配图像融合的噪声标准差变化

Fig. 2 Noise standard deviation of weight distribution image fusion with different spectral non-linear amplification noises

3 实验验证与讨论分析

原理性验证光学表面疵病彩色编码成像有两个关键设计点:1)三基色光谱响应平衡的高分辨率面阵彩色感光元器件;2)与彩色感光元器件光谱响应特征精确匹配的宽光谱可见光均匀照明光源。如图 3(a)所示,彩色感光元器件通常采用拜尔三基色滤光片,目的是在对应的像素点上分别对三基色进行感应。由 4 个像素点构成一组彩色成像单元,在实现彩色成像的同时可通过数据插值等数字化处理来丰富成像图案的细节。在彩色感光元器件光谱响应特性选择方面,最为关键的是对三基色的光电转换响应要均衡,以消除因接收传感器的光谱效应造成的图像信息不平衡。为实现上述技术要点,经对国内外相关彩色感光元器件的详细调研比对,最终选择 Mako G-419 型彩色 CMOS,其三基色滤光片的光谱响应如图 3(b)所示。该彩色 CMOS 不但在红、绿、蓝三个可见波段的光电转换响应均衡,而且在 800 nm 左右的红外波段可实现均衡光电转换响应。该型号的 CMOS 像素分辨率为 2048 pixel \times 2048 pixel,最小像素尺寸为 5.5 μm 。为与该 CMOS 的光谱响应特性准确匹配,本实验方案选定 400~850 nm 波段的发光二极管(LED)白光光源作为均匀照明光源。

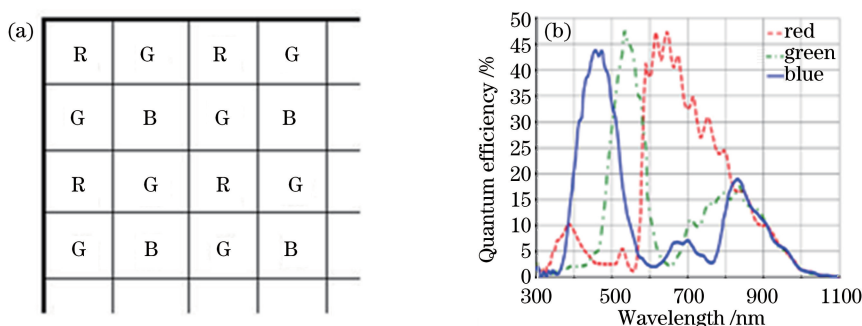


图 3 (a)三基色接收阵列示意图;(b)光谱响应曲线

Fig. 3 (a) Schematic of three-primary-color receiving arrays; (b) spectral response curves

3.1 明场显微成像图像融合实验验证与分析

为验证上述图像融合法在微米量级表面疵病检测方面的效果,实验中选配了 20 \times 和 100 \times 显微物镜(Newport),对定标的待测样品进行成像。实验中采用同一 CMOS 传感器,对同一白光光源辐照下红、绿、蓝三色滤光后获取的表面疵病图像进行边缘特征提取及加权融合,比对分析三基色单色滤光及白光照明下获取图像的信噪比。

实验样品采用 1053 nm 飞秒激光器对 K9 玻璃基板上增透膜产生破坏损伤,在 20~50 μm 量级内形成可定标的损伤样点,以便于进行实际成像与分析研究,其损伤尺寸和排布如图 4 所示。

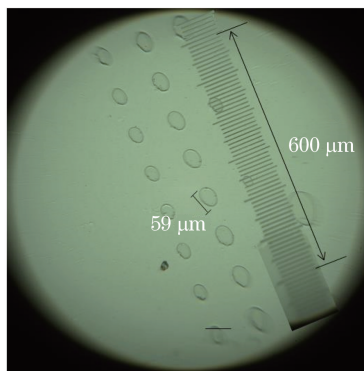


图 4 待测样品表面损伤定标图像

Fig. 4 Calibrated image of surface damage of the sample to be tested

采用白色 LED 环形阵列作为近摄成像的照明光源,在照明光源和待测样品间依次加装红色、绿色和蓝色滤光片以实现单色光照明成像对比实验。图 5 分别给出在红、绿、蓝以及白光 4 种照明条件下的表面损伤图像,选取其中结构特殊、细节丰富的一个损伤点作为比对分析的样品,如图 6 所示。

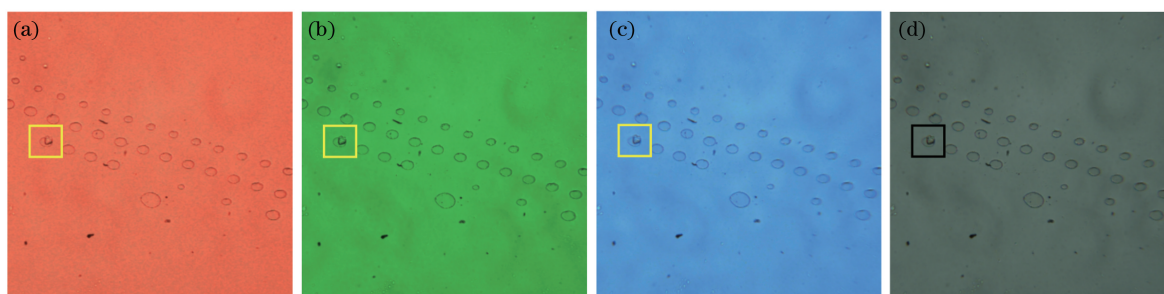


图 5 20×放大的表面损伤图像。(a)红光;(b)绿光;(c)蓝光;(d)白光
Fig. 5 20× magnified surface damage images. (a) Red light; (b) green light;
(c) blue light; (d) white light

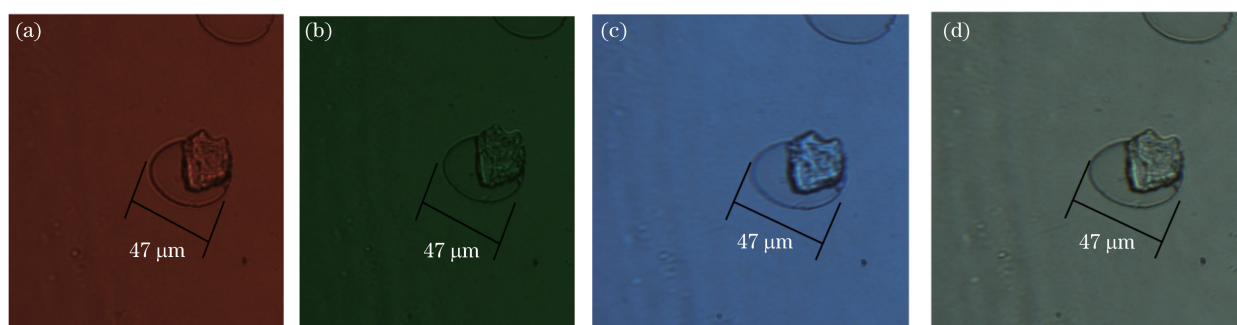


图 6 对单个损伤点 100×放大图像。(a)红光;(b)绿光;(c)蓝光;(d)白光
Fig. 6 100× magnified images of single damage point. (a) Red light; (b) green light;
(c) blue light; (d) white light

在表面疵病自动检测中,边缘特征提取是通常采用的技术手段,主要用于自动化疵病甄别和统计。本实验采用 Canny 边缘检测算法^[18-20]对图 6 所示损伤点进行边缘特征提取,结果如图 7 所示。在不同波段照明下的损伤成像图中不能明显区分损伤的细微特征(图 6),但是在边缘特征二值化图像中不同波段照明的区别则相当明显(图 7)。

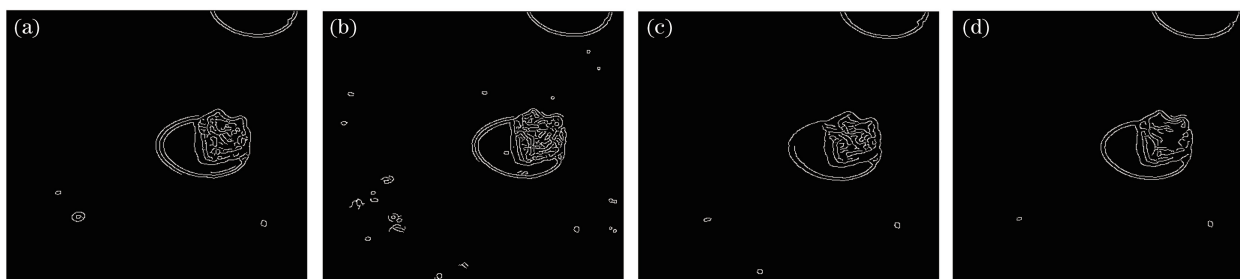


图 7 传统边缘特征二值化图像。(a)红光;(b)绿光;(c)蓝光;(d)白光
Fig. 7 Traditional edge feature binarization images. (a) Red light; (b) green light;
(c) blue light; (d) white light

由图 7 可知,对应彩色 CMOS 中三基色的响应频谱,在三幅单色光图像中,由于绿光响应效率最高(图 3),从而通过边缘特征提取的二值化图像中噪声也最大,而蓝光响应较低,其提取的微小图像较少。在白光照明下,整体光谱波段向近红外偏移并接近 CMOS 均衡响应区,但光电转换效率较低,因此提取的边缘图像在一定程度上损失部分细节,如图 7(d)所示,该照明条件不利于微小疵病的实际分析。

为了更好地说明像素级动态融合的效果,图 8(a)~(d)采用整幅图像固定权值分配,其权值分配分别为设定为红光权值较大、绿光权值较大、蓝光权值较大、三基色为均值,详见表 1。图 8(e)则采用像素级动态融合方法得到的最优融合图。

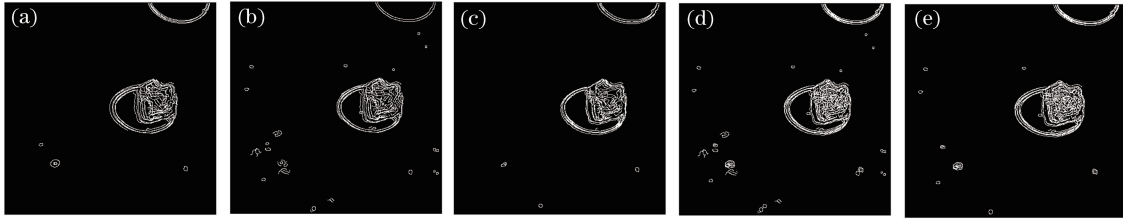


图 8 动态彩色编码图像融合效果。(a)红光;(b)绿光;(c)蓝光;(d)均值;(e)最优融合图

Fig. 8 Dynamic spectral coding image fusion effects. (a) Red light; (b) green light; (c) blue light; (d) average weight; (e) optimized fusion image

表 1 图像融合权值分配组合

Table 1 Image fusion weight distribution combinations

Fusion image	f_1	f_2	f_3
Fig. 8 (a)	0.70	0.15	0.15
Fig. 8 (b)	0.15	0.70	0.15
Fig. 8 (c)	0.15	0.15	0.70
Fig. 8 (d)	0.33	0.33	0.33

通过对放大后的表面疵病进行图像融合可知,不同的权值对图像细节的提取影响不同,这也印证动态权值选取的必要性。在目标信号成像细节方面,以图 7(a)~(d)所示的单一滤波或白光照明的边缘特征图和对应的图 8(a)~(d)所示的采用彩色编码图像融合做对比分析,可以发现采用彩色编码融合方法获取的检测目标的细节明显更丰富,边界更清晰。

与图 8(e)所示的像素级动态权值图像融合效果相比,图 8(a)~(d)所示的采用整幅固定权值融合方法总会存在检测目标细节和噪声两方面的权衡。而从图 8(e)所示的最优权值融合提取图可以明显看出,在比图 8(a)~(d)更为真实地还原显微成像原图细节的前提下,其比图 8(d)更有效地抑制噪声,符合光学元件表面疵病检测的实际需求,即该方法在保持足够的检测目标细节的基础上,具有较大的信噪比。这是由于在这种微米量级的表面疵病检测中,像素级的动态权值融合可结合图像细节,从而逐点地根据图像梯度进行优化,是一种优化的融合效果。

3.2 暗场成像图像融合实验验证与分析

在实际高精度疵病检测中,为了提高检测精度和效率,通常采用明暗场结合的方式^[1],即先全口径暗场扫描获得缺陷点的位置和初步形貌特征,再进行明场显微成像以获得缺陷的真实形态。因此,暗场扫描的找全、找真,是决定检测效果和效率的前提条件。也就是说,验证该优化方法在暗场成像中的高保真效果,对疵病检测的成败更为重要。

上一节中的实验结果和分析给出该方法在明场成像中微米量级疵病检测的优化效果。为了进一步验证该方法在暗场成像中的可行性,采用一定口径的光学元件进行疵病检测和分析。被测光学元件为正方形 K9 玻璃基板,口径 300 mm,将基板固定在安装框架内,白光 LED 光源阵列从四周边框处对元件进行照明,采用远心镜头(Zeiss VISIONMES)对光学元件进行成像,在照明光源和待测样品间分别加装红色、绿色和蓝色滤波片以实现单色光照明成像条件,选取其中尺寸为 80 mm×86 mm 的区域进行成像配准和计算分析,如图 9 所示。

根据上文描述的动态加权方法进行图像融合。对融合后的图像进行分析,可以看到融合后的图像保留每个通道的图像细节,同时噪声也被很好地抑制。为了说明融合的有效性,特别是暗场成像条件通常存在疵病检测图像边界梯度不明显的区域而造成漏检时,采用客观无参考评价方法灰度平均梯度 V_{GMG} ^[15]对图像进行评价,可以表示为

$$V_{GMG} = \frac{1}{(I-1)(J-1)} \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{j=1}^{J-1} \sqrt{\frac{[A(i+1,j) - A(i,j)]^2 + [A(i,j+1) - A(i,j)]^2}{2}}, \quad (8)$$

式中 $A(i,j)$ 代表大小为 $I \text{ pixel} \times J \text{ pixel}$ 的待测图像。 V_{GMG} 值越高,图像质量越好。

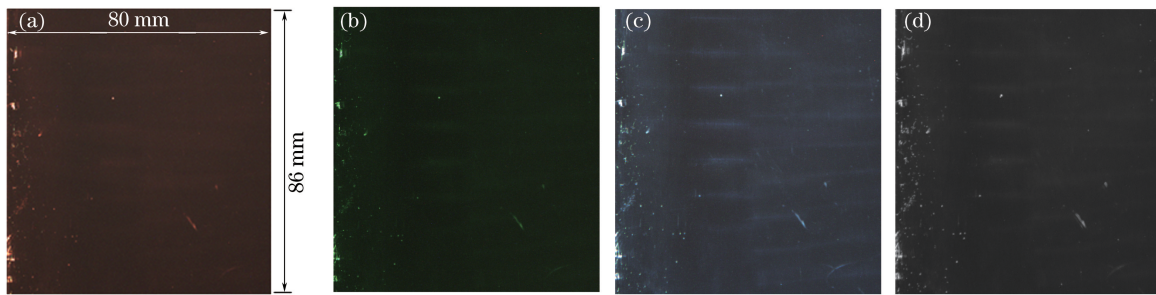


图9 表面疵病成像与图像融合对比。(a)红光;(b)绿光;(c)蓝光;(d)优化融合图

Fig. 9 Comparison of surface defects imaging and image fusion. (a) Red light; (b) green light; (c) blue light; (d) optimized fusion image

将融合后的图像以及不同照明下的图像通过 V_{GMG} 计算比较,同时分别对所获得的图像进行特征提取,统计 $20\sim 500\ \mu\text{m}$ 的疵病数量,计算后的结果如表2所示。

表2 图像客观评价表

Table 2 Objective evaluation of the image

	Red filter	Green filter	Blue filter	Fusion image
V_{GMG}	1.5595	1.4678	2.1353	2.5365
Number of surface defect	23	36	45	53

由计算结果可知,融合后的图像质量有所提高,同时融合不同波段的细节,最大可能地保留所有通道的缺陷,增加缺陷搜索的完整性,有效地解决缺陷检测中如何尽量完整地找到所有缺陷这个瓶颈的问题。

4 结 论

针对表面微小疵病在不同波长照明时存在非线性放大畸变问题,利用红、绿、蓝三基色光源辐照下的疵病图像进行动态彩色编码成像,经权值分配融合后实现高冗余信息的图像合成。建立光谱非线性放大信号噪声分析模型,通过理论分析和数值模拟,充分验证动态权值融合降低标准偏差的有效性,从理论上给出了动态图像融合的合理解释。分别实验研究了单个疵病显微明场成像和中等口径元件的暗场成像两组动态图像融合效果,对比分析结果表明,提出的像素级动态融合彩色编码图像优化方法能够在获取微米级表面疵病丰富细节的同时,有效降低信噪比。

参 考 文 献

- [1] Rainer F. Mapping and inspection of damage and artifacts in large-scale optics[J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 1997, 3244: 272-281.
- [2] Prasad R R, Bernacil M, Halpin J, *et al.* Design of an illumination technique to improve the identification of surface flaws on optics[C]. SPIE, 2004, 5647: 421-426.
- [3] Prasad R R, Bruere J R, Halpin J M, *et al.* Design of a production process to enhance optical performance of 3ω optics [C]. SPIE, 2003, 5273: 296-302.
- [4] Cheng Xiaofeng, Xu Xu, Zhang Lin, *et al.* Defect testing of large aperture optics based on high resolution CCD camera [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(11): 1677-1680.
程晓锋, 徐旭, 张林, 等. 基于高分辨力 CCD 的大口径光学元件疵病检测[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(11): 1677-1680.
- [5] Yang Yongying, Lu Chunhua, Liang Jiao, *et al.* Microscopic dark-field scattering imaging and digitalization evaluation system of defects on optical devices precision surface[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(6): 1031-1038.
杨甬英, 陆春华, 梁蛟, 等. 光学元件表面缺陷的显微散射暗场成像及数字化评价系统[J]. 光学学报, 2007, 27(6): 1031-1038.
- [6] Ravizza F L, Nostrand M C, Kegelmeyer L M, *et al.* Process for rapid detection of fratricidal defects on optics using linescan phase-differential imaging[C]. SPIE, 2009, 7504: 75041B.
- [7] Campbell J H, Hawleyfedder R A, Stolz C J, *et al.* NIF optical materials and fabrication technologies: an overview

- [C]. SPIE, 2004, 5341: 84-101.
- [8] During A, Fossati C, Commandré M. Multiwavelength imaging of defects in ultraviolet optical materials[J]. Applied Optics, 2002, 41(16): 3118-3126.
- [9] Demos S G, Staggs M, Minoshima K, *et al.* Characterization of laser induced damage sites in optical components[J]. Optics Express, 2003, 10(25): 1444-1450.
- [10] Conder A, Azevedo S, Kegelmeyer L, *et al.* Final optics damage inspection (FODI) for the national ignition facility [C]. SPIE, 2007, 7797: 77970P.
- [11] Zhang Bo, Ni Kaizao, Wang Linjun, *et al.* New algorithm of detecting optical surface imperfection based on background correction and image segmentation[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0911004.
张 博, 倪开灶, 王林军, 等. 基于背景校正和图像分割定量分析光学元件表面疵病的新算法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0911004.
- [12] Salteo A, Stolz C J, Kozlowski M R. Laser-induced damage of fused silica at 355 nm initiated at scratches[C]. SPIE, 1998, 3244: 341-347.
- [13] You Kewei, Zhang Yanli, Zhang Xuejie, *et al.* Influence of relative position of optical component surface defects on near field beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0308004.
尤科伟, 张艳丽, 张雪洁, 等. 光学元件表面缺陷相对位置分布对近场光束质量的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0308004.
- [14] Jiao Zhaoyang, Zhang Yanli, Zhang Junyong, *et al.* Influence of phase distortion on near field beam quality in final target system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0502004.
焦兆阳, 张艳丽, 张军勇, 等. 终端靶场中相位畸变对近场光束质量的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0502004.
- [15] Duchateau G, Feit M D, Demos S G. Strong nonlinear growth of energy coupling during laser irradiation of transparent dielectrics and its significance for laser induced damage[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(9): 093106.
- [16] Toet A. Multi-scale contrast enhancement with applications to image fusion[J]. Optical Engineering, 1992, 31(5): 1026-1031.
- [17] Qin Xunhui, Ma Rong, Fu Weiping, *et al.* A line segments detection algorithm based on grad[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(2): 205-209.
覃勋辉, 马 戎, 付维平, 等. 一种基于梯度的直线段检测算法[J]. 光子学报, 2012, 41(2): 205-209.
- [18] Cao Maoyong, Sun Nongliang, Yu Daoyin. Digital image evaluation function based on gray gradient [J]. Opto-Electronic Engineering, 2003, 30(4): 69-72.
曹茂永, 孙农亮, 郁道银. 基于灰度梯度的数字图像评价函数[J]. 光电工程, 2003, 30(4): 69-72.
- [19] Li Junshan, Ma Ying, Zhao Fangzhou, *et al.* A novel arithmetic of image edge detection of Canny operator[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(s1): 50-54.
李俊山, 马 颖, 赵方舟, 等. 改进的 Canny 图像边缘检测算法[J]. 光子学报, 2011, 40(s1): 50-54.
- [20] Luo Tao, Zheng Xifeng, Ding Tiefu. Improved self-adaptive threshold Canny edge detection [J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(11): 106-111.
雒 涛, 郑喜凤, 丁铁夫. 改进的自适应阈值 Canny 边缘检测[J]. 光电工程, 2009, 36(11): 106-111.