应用光学
Journal of Applied Optics
SCOPUS,等来源期刊
中文核心期刊、中国科技核心期刊

消费级镜头MTF在线检测算法优化

张进 张卓成 秦文罡 张旭 刘政 吴强华

Optimization of online MTF detection algorithm for consumer-level lenses

ZHANG Jin, ZHANG Zhuocheng, QIN Wengang, ZHANG Xu, LIU Zheng, WU Qianghua

引用本文:
张进, 张卓成, 秦文罡, 等. 消费级镜头MTF在线检测算法优化[J]. 应用光学, 2026, 47(2): 364-373. DOI: 10.5768/JAO202647.0203003
ZHANG Jin, ZHANG Zhuocheng, QIN Wengang, et al. Optimization of online MTF detection algorithm for consumer-level lenses[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(2): 364-373. DOI: 10.5768/JAO202647.0203003

在线阅读 View online: https://doi.org/10.5768/JAO202647.0203003

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

EBAPS的调制传递函数测试系统

Modulation transfer function testing system for EBAPS

应用光学. 2024, 45(5): 992-1000 https://doi.org/10.5768/JAO202445.0503001

基于三线靶标的红外遥感卫星相机在轨MTF检测方法

On-orbit MTF evaluation of infrared spaceborne cameras based on three-bar target patterns

应用光学. 2025, 46(5): 1083-1089 https://doi.org/10.5768/JAO202546.0503003

光电成像系统动态调制传递函数测量装置

Dynamic modulation transfer function measuring device for photoelectric imaging system

应用光学. 2021, 42(4): 592-596 https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401004

用于大型阶梯轴直径测量的光学成像系统设计

Design of optical imaging system for large-scale step-shaft diameter measurement

应用光学. 2025, 46(6): 1353-1360 https://doi.org/10.5768/JAO202546.0601001

大气湍流对航空光电侦察图像质量影响因素分析

Influencing factors of atmospheric turbulence on image quality of aerial photoelectric reconnaissance

应用光学. 2022, 43(1): 1-8 https://doi.org/10.5768/JAO202243.0101001

基于B样条曲线的投影图像边缘融合方法

Projection image edge fusion method based on B-spline curve

应用光学. 2021, 42(6): 1040-1047 https://doi.org/10.5768/JAO202142.0602005

关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号：1002-2082 (2026) 02-0364-10
引用格式：张进, 张卓成, 秦文罡, 等. 消费级镜头 MTF 在线检测算法优化 [J]. 应用光学, 2026, 47(2): 364-373.
ZHANG Jin, ZHANG Zhuocheng, QIN Wengang, et al. Optimization of online MTF detection algorithm for consumer-level lenses[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(2): 364-373.

在线阅读

消费级镜头 MTF 在线检测算法优化

张 进[1], 张卓成[1], 秦文罡[1], 张 旭[2], 刘 政[3], 吴强华[4]

（1. 西安工业大学 光电工程学院 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710021; 2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 3. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 4. 江西特莱斯光学有限公司, 江西 赣州 341700）

摘 要：调制传递函数（modulation transfer function, MTF）是目前公认的最为客观、有效的光学镜头检测方法。针对 ISO12233 刃边法检测数据时存在误差，且抗噪性差的问题，提出了一种系统优化算法流程，通过基于最大类间方差法（Otsu）的 Canny 算子来提高边缘检测的准确性和噪声抑制能力；将 Bisquare 方法代替最小二乘法以减小刃边拟合误差；采用三次 Fermi 函数求解边缘扩散函数（ESF），解决噪声引起的数据震荡以及离散数据后续处理中的误差问题。实验结果表明，与 ISO12233 算法相比，优化后的算法更准确，测试精度符合标准，完全满足实际工业生产中镜头检测任务的需求。

关键词：调制传递函数；刃边法；边缘扩散函数；Bisquare 方法；三次 Fermi 函数
中图分类号：TN206 **文献标志码**：A **DOI**: 10.5768/JAO202647.0203003

Optimization of online MTF detection algorithm for consumer-level lenses

ZHANG Jin[1], ZHANG Zhuocheng[1], QIN Wengang[1], ZHANG Xu[2], LIU Zheng[3], WU Qianghua[4]

（1. Shaanxi Province Key Laboratory of Thin Films Technology and Optical Test, School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 3. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 4. Jiangxi Trace Optical Co., Ltd., Ganzhou 341700, China）

Abstract: The modulation transfer function (MTF) is currently recognized as the most objective and effective method for optical lens testing. In response to the issues of errors in ISO12233 edge detection data and poor noise resistance, a systematic optimization algorithm process was proposed. The accuracy of edge detection and noise suppression capabilities were enhanced by employing a Canny operator based on the Otsu method, the edge fitting error was reduced by substituting the Bisquare method for the least square method, and the data oscillation caused by noise and the errors in subsequent processing of discrete data were solved by using a cubic Fermi function to solve the edge spread function (ESF). Experimental results show that, compared with the ISO12233 algorithm, the optimized algorithm is more accurate, with test precision meeting standards, which is fully satisfied the requirements of lens testing tasks in actual industrial production.

Key words: modulation transfer function; edge method; edge spread function; Bisquare method; cubic Fermi function

引言

消费级镜头是指设计和制造主要面向普通消费者市场的光学镜头，在价格、性能和功能方面适合日常使用。进入 21 世纪以来，随着光学与图像

收稿日期：2024-11-13； **修回日期**：2025-04-03
基金项目：陕西省重点研发计划一般项目-工业领域（2024GX-YBXM-085）；陕西省教育厅重点科学研究计划项目（23JY033）
第一作者：张进，E-mail: j.zhang@xatu.edu.com

处理技术的飞速发展, 消费级镜头已广泛应用于移动设备、安防监控、物品扫描、生物识别及医疗器械等众多行业[1-5]。随着消费级镜头像素和产量的日益提高, 镜头成像质量在线快速检测显得尤为重要。

调制传递函数(modulation transfer function, MTF)通常用来衡量成像系统的分辨率和清晰度, 是目前公认的最为客观、有效的光学镜头检测方法。ISO12233[6]是国际标准化组织(international organization for standardization, ISO)制定的成像质量评估标准。2000 年, 由 BURNS P D 提出的刃边法作为 MTF 测试的有效手段被 ISO12233 所采纳[7-8]。

MTF 的计算依赖于从图像中准确提取边缘信息, 因此刃边边缘检测的准确性至关重要。边缘定位的精确性直接影响到后续边缘扩散函数(edge spread function, ESF)和线扩散函数(line spread function, LSF)的计算准确度, 进而影响到 MTF 的准确计算。如果边缘定位不准确, 将导致误差累积, 最终影响整个成像系统性能评估的准确性。ISO12233 刃边法采用质心法获取图像的边缘信息, 在理想图片条件下, 基于刃边区域的灰度质心可以准确定位刃边位置。然而在实际应用中, 图像噪声是不可避免的, 它会增加图像数据的随机波动, 将导致质心计算偏离真实的边缘位置。噪声来源于多种因素, 包括但不限于传感器噪声[9]、环境光噪声[10]、电子设备的噪声[11]以及图像压缩造成的失真[12]等。

消费级镜头(如手机镜头、安防监控镜头)的 MTF 特性受成本与设计限制, 呈现以下显著特征: (1) 高频衰减显著。受限于光学设计简化与制造公差, 高频空间频率的 MTF 值下降较快, 影响细节分辨能力; (2) 视场依赖性。轴外视场因光学畸变与像差加剧, MTF 值较轴上视场显著降低; (3) 噪声敏感性。消费级镜头经常搭配低端传感器或在低光照环境下使用, 图像噪声易导致传统算法(如 ISO12233 质心法)失效。这些特点使得 ISO12233 刃边法在消费级镜头检测中存在边缘定位偏差、抗噪性不足及高频误差累积等问题, 亟需针对性优化[13-15]。因此, 学者们仍一直致力于提升刃边法的检测准确性和抗噪能力。MASAOKA K 等人针对 ISO12233 中倾斜刃边法抗噪性不强的问题, 通过对图像数据执行二维函数拟合, 以此来估算边缘角度, 提升了边缘检测精度和抗干扰能力[16]。董英娟等人采用最小二乘法拟合的基于 Canny 算子边缘检测方法, 直线拟合精度提升了 4.12%, MTF 整体均值提高了 0.5792%[17]。黄怡静等人采用改进的 Canny 算子使去噪图像质量提升 10%~20%, 边缘评价指标提高 15%~20%[18]。上述报道仅是对刃边法某一环节进行优化和改进, 但 MTF 检测误差是由多方面构成, 如边缘检测误差、图像噪声、拟合误差等, 单一的算法优化无法满足整体检测精度和抗噪能力的提高。

本文对刃边法计算 MTF 关键步骤依次进行优化改进, 包括刃边边缘检测、边缘数据拟合和 ESF 数据的拟合, 分析数学原理, 选择优化方法, 进行仿真实验, 并验证优化方案的正确性和实用性。

1　算法的分析与优化

ISO12233 和改进刃边法算法流程图如图 1 所示。ISO12233 中刃边法的算法流程主要包括: 质心法提取边缘、边缘数据拟合、求解 LSF。这些步骤均会引起误差的产生, 图像噪声会导致边缘检测发生误差, 边缘角度的识别误差对 MTF 检测的结果有显著影响。汉明窗虽然起到了噪声抑制的效果, 但同时牺牲了分辨率。鉴于此, 改进刃边法以边缘数据检测、边缘数据拟合和求解 ESF 易引入误差的关键步骤为抓手, 以 Canny 算子结合 Otsu



(a) ISO12233标准推荐算法流程　(b) 改进刃边法算法流程

图 1　ISO12233 和改进刃边法算法流程图

Fig. 1　Flow charts of ISO12233 and improved edge method algorithm

阈值法替代 ISO12233 质心法，提高边缘检测的准确性和噪声抑制能力；将 Bisquare 方法代替最小二乘法以减小刃边拟合误差；采用函数模型拟合求解 ESF，解决噪声引起的数据震荡以及离散数据后续处理中的误差问题。

1.1 刃边边缘数据检测算法的选择

常用的边缘检测算法有 Canny、Roberts、Sobel、Prewitt 和 LoG 5 种算子。Canny 边缘检测算法涵盖了多个关键步骤：对噪声的平滑过滤、梯度幅度和方向的计算、非极大值抑制以及采用双阈值进行边缘检测和连接。这种多阶段的处理方式能够更精确地定位边缘。在进行边缘检测之前，Canny 算子首先应用高斯滤波器对图像进行平滑处理，有效降低了图像中的噪声，进而提升了边缘检测的精度，并且采用双阈值方法来确定真实边缘，使得算法能够更好地处理边缘检测的连续性，即通过高阈值检测强边缘和通过低阈值连接弱边缘。

相比之下，其他算子如 Sobel、Prewitt 主要用于边缘强度的粗略估计，而不包含 Canny 算法中的非极大值抑制和双阈值边缘连接等步骤，因此在边缘定位的准确性和噪声抑制能力上通常不如 Canny 算子。Roberts 算子虽然计算简单，但对噪声比较敏感。LoG 算子虽然能够检测到边缘的位置，但在边缘的细节处理和噪声抑制方面不如 Canny 算子。如图 2 所示，针对消费级镜头噪声敏感性问题，Canny 算子结合 Otsu 阈值法通过自适应双阈值抑制随机噪声干扰，避免质心法在高斯模糊或低信噪比时误差显著增大，刃边边缘分布从 20 个像素以上降低到 5 个像素以内，从而提高边缘检测的准确性和自动化程度。

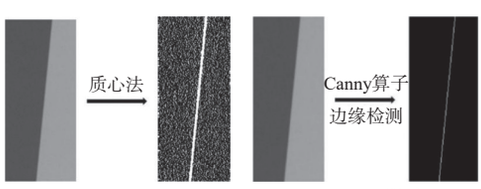


图 2 质心法和 Canny 算子检测的刃边边缘对比

Fig. 2 Comparison of edge detection results using centroid method and Canny operator

1.2 刃边边缘数据拟合算法的选择

ISO12233 采用最小二乘法对刃边边缘数据进行拟合，最小二乘法通过最小化观测数据的实际值与模型预测值之间的残差平方和来计算，通过对数据的所有残差进行平方求和，并最小化总和来确定拟合曲线。如果数据集中存在离群点或异常值，最小二乘法会尝试将这些点纳入拟合曲线中，从而导致整体拟合效果变差。此外，最小二乘法的鲁棒性较差，当数据分布偏离正态分布较远时，最小二乘法得出的结果与最优解之间存在较大偏差。

Bisquare 方法是一种高鲁棒性拟合方法，旨在减少异常值对拟合的影响。该方法使用一个截尾函数，如式 (1) 所示，将大残差的影响减小，而对小残差的影响保持较小。通过减小大残差对拟合的影响，可以更好地保持拟合的稳定性。

$$\omega_i=\begin{cases}\left(1-\left(\dfrac{r_i}{k}\right)^2\right)^2, & |r_i|<k\\ 0, \text{ 其他}\end{cases} \tag{1}$$

式中：r_i为第i个数据点的残差；k为一个阈值，用于确定哪些残差足够小，可以认为是由正常变异引起的，而哪些残差足够大，应该被视为异常值；ω_i为分配给第i个观测值的权重。

对于在实际检测过程中可能存在具有边缘高斯噪声、椒盐噪声、泊松噪声、边缘畸变等影响的刃边，特别是这些异常可能严重扭曲拟合结果的情况下，采用具备鲁棒回归技术的 Bisquare 方法更合适，可获得更加准确可靠的边缘拟合结果。

1.3 求解 ESF 误差分析与优化

ISO12233 标准算法通过离散微分与汉明窗抑制噪声，求解 LSF，但在实际应用中存在以下 3 种误差源。

首先，当刃边图像存在噪声时，ESF 曲线会变的不平滑，出现局部波动，离散微分放大噪声干扰，使 LSF 计算不稳定。同时，噪声的随机性意味着即使是在相同条件下获取的连续图像，其噪声特性也可能有所不同，这会影响 ESF 测量的可重复性，从而导致成像系统性能评估的不确定性，进而影响到系统设计和优化决策的准确性。

其次，通常采用倾斜的刃边方法，刃边与成像器件的像素列之间形成了一定角度 θ，如图 3 所示。在这种情况下，采样点到刃边的水平距离 d 不同于它们之间的垂直距离 x，二者的关系为

$$d=e_x(x)=\hat{e}\left(\frac{x}{\cos\theta}\right) \tag{2}$$

对式 (2) 求导，再进行傅里叶变换可得：

$$H(\xi,0)=\hat{H}(\xi\cos\theta,0) \tag{3}$$

因此，ESF 和 LSF 在空间域上的展宽会导致 MTF 在频率上产生一个压缩，高频分辨率评估出

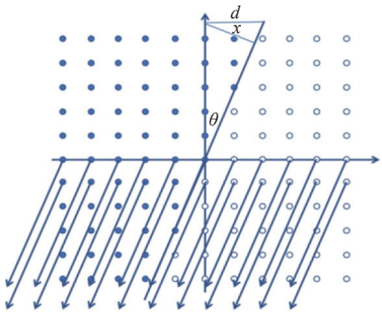


图 3　倾斜刃边采样示意图

Fig. 3　Schematic diagram of tilted edge sampling

现偏差。

最后, 过采样获得的 ESF 数据是离散的, ESF 通过微分运算求得 LSF, 可表示为

$$\hat{l}_x(x_j)=\frac{1}{x_j-x_{j-1}}\left[\hat{e}_x(x_j)-\hat{e}_x(x_{j-1})\right] \tag{4}$$

式中, x_j代表第j个采样点的坐标。公式 (4) 的离散化近似导数会引入阶梯效应, 尤其在 ESF 陡变区域误差显著。同时, 存在的噪声会在这一过程中被放大, 导致 LSF 的计算结果不稳定, 尤其是在 ESF 数据中噪声水平较高时, 这种效应更为显著。

为了消除噪声、微分运算及 MTF 频率域压缩的误差影响, 本文采用函数模型对过采样数据进行非线性拟合, 以获取 ESF 的公式, 通过此方法消除图像噪声带来的数据振荡现象。这种方法可以直接从拟合得到的连续函数中求导得到 LSF, 而不是依赖于数字图像处理中常用的离散微分方法, 从而提高了测量的精确度和鲁棒性。

根据函数模型与典型 ESF 曲线的形态相似性, 常用的拟合模型有:

基于 Gaussian 分布的函数模型。假定 LSF 遵循 Gaussian 分布的模型, 则相应的 ESF 函数模型可以表示为

$$e_x(x)=a*\mathrm{erf}\left(\frac{x-b}{c}\right)+d \tag{5}$$

式中: a 为亮暗区的灰度差值; b 为边缘位置的中心坐标; c 为过渡宽度的尺度因子; d 为暗区的灰度基线值。误差函数$\mathrm{erf}(x)$可表示为

$$\mathrm{erf}(x)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_{-\infty}^{x}e^{-t^2}\mathrm{d}t \tag{6}$$

基于 Hyperbolic 函数的模型。双曲反正切函数在远离中心点的地方接近于其渐近线, 而在中心点附近则表现出快速的过渡, 这非常符合 ESF 曲线的特性。ESF 的函数模型可表示为

$$e_x(x)=a*\arctan\left(\exp\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)\right)+\arctan\left(\exp\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)\right)+d \tag{7}$$

式中: a 为亮暗区的灰度差值; b_1 和 b_2 分别为第 1 和第 2 双曲反正切函数的中心位置; c_1 和 c_2 分别为第 1 和第 2 双曲反正切函数的过渡宽度尺度因子; d 为暗区的灰度基线值。

基于 Fermi 函数的模型。三次 Fermi 函数的线性组合与 ESF 数据的曲线特性相似, ESF 的函数模型可表示为

$$e_x(x)=\sum_{i=1}^{3}\frac{a_i}{\exp\left[(x-b_i)/c_i\right]+1}+d \tag{8}$$

参数初始值为

$$\begin{cases}d=\mathrm{ESF}_{a\min}\\ a_1=0.75(\mathrm{ESF}_{a\max}-\mathrm{ESF}_{a\min})\\ a_2=0.125((\mathrm{ESF}_{a\max}-\mathrm{ESF}_{a\min}))\\ a_3=0.125((\mathrm{ESF}_{a\max}-\mathrm{ESF}_{a\min}))\\ b_1=R\\ b_2=R+0.5\\ b_3=R-0.5\\ c_1=\pm0.15\\ c_2=\pm0.14\\ c_3=\pm0.14\end{cases} \tag{9}$$

式中: R为 ESF 的边缘位置; $\mathrm{ESF}_{a\max}$和$\mathrm{ESF}_{a\min}$分别为刃边图像亮区域的灰度平均值和刃边图像暗区域的灰度平均值。当刃边是上升边缘时, c_i对应+符号, 当刃边是下降边缘时, c_i对应−符号。

本文对提取的刃边图像的 ESF 数据使用上述几种非线性函数进行拟合, 并进行误差评估, 从而确定拟合函数类型。

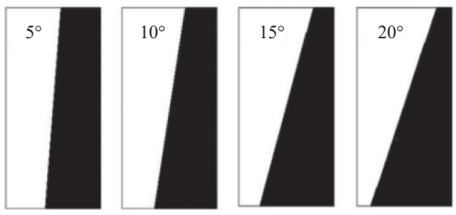
2　仿真结果及分析

2.1　刃边边缘检测仿真结果

理想刃边图和退化刃边图如图 4 所示。图 4(a) 中, 分别制作了 5°、10°、15°、20°刃边倾斜角度的理想刃边图像。为了更接近实际采样情况, 使用高斯函数公式来模拟点扩散函数(PSF), 如式 (10) 所示:

$$f(x,y)=A\exp\left[-\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{10}$$

通过将理想的刃边图像与 PSF 进行卷积运算, 可以得到退化后的刃边图像。不同的高斯因子 σ 可以表征不同透镜的成像效果, 将高斯因子 σ 分别



(a) 5°、10°、15°、20°理想刃边图



(b) 5.0°刃边σ分别为0.5、1.0、3.0、5.0时退化后的图

图 4 理想刃边图和退化刃边图

Fig. 4 Ideal edge and degraded edge images

设定为 0.5、1、3、5, 退化后的图像如图 4(b) 所示。

分别采用质心法和 Canny 算子结合 Otsu 的阈值法, 对每个角度及各角度退化后的刃边图像进行检测, 结果如表 1 所示。

表 1 不同退化程度、不同角度刃边质心法和阈值法刃边角度检测结果

Table 1 Edge angle detection results of centroid method and threshold method with different degradation levels and angles

刃边角度/(°)	退化程度	质心法/(°)	相对误差/%	阈值法/(°)	相对误差/%
5	σ=0.5	4.60	7.97	4.96	0.72
	σ=1	4.43	11.50	4.88	2.31
	σ=3	4.24	15.25	4.95	0.91
	σ=5	4.22	15.70	4.40	12.09
10	σ=0.5	8.94	10.61	9.35	6.52
	σ=1	8.32	16.79	9.35	6.52
	σ=3	7.69	23.07	9.55	4.51
	σ=5	7.63	23.68	8.97	10.28
15	σ=0.5	14.18	5.44	15.79	5.25
	σ=1	13.07	12.85	15.79	5.30
	σ=3	12.87	14.23	15.92	6.11
	σ=5	12.76	14.93	12.95	13.76
20	σ=0.5	18.50	7.51	19.01	4.94
	σ=1	17.39	13.03	19.08	4.61
	σ=3	16.17	19.14	19.16	4.19
	σ=5	16.07	19.65	17.97	10.17

将表 1 中数据进行归纳, 如图 5 所示。从图 5 可以看出, 对于退化后的数字刃边图像, 高斯因子 σ 越高, 质心法的检测精度越低, 当高斯因子 σ = 3 时检测刃边角度误差已经在 2°以上, 相对误差最高可达 20%。优化后的阈值法中当高斯因子 σ 在 3 以内时, 相对误差控制在 5% 左右, 高斯因子 σ=5 时, 相对误差则在 10% 左右, 在刃边角度较小的情况下, 角度识别相对误差下降了近一半。

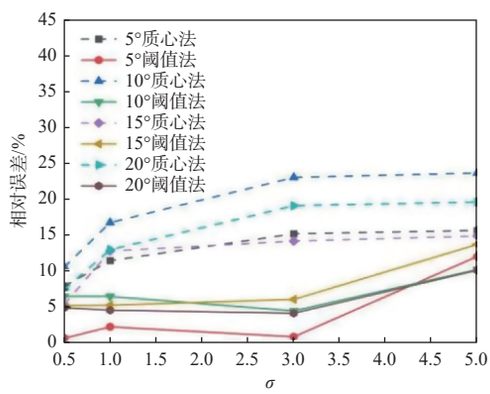


图 5 质心法和阈值法识别不同退化程度、不同角度刃边相对误差

Fig. 5 Relative errors of edge angle detection by centroid method and threshold method with different degradation levels and angles

当 σ=3 时, 阈值法获得的相对误差较 σ=0.5 和 σ=1 时更小, 其原因在于: 当 σ=3 时, 刃边过渡区宽度约为 9 个像素, 使边缘过渡区充分展宽, 亮暗交替接近理想 S 型曲线, 灰度直方图双峰显著, Otsu 算法能精准分割边缘; σ=0.5 时过渡区宽度较小(≈1.5 像素), 边缘梯度陡峭导致离散化误差敏感, 角度识别易产生误差; σ=1 时过渡区展宽不足(≈3 像素), Canny 算子的非极大值抑制阶段难以准确定位梯度峰值, 导致边缘细节丢失。这也说明了阈值法在中等退化场景下的优势。

此外, 质心法在 σ=3 和 σ=5 时角度识别误差相近, 主要是因为质心法通过计算灰度质心定位边缘, 对边缘模糊高度敏感。当 $\sigma \geqslant 3$ 时, 过渡区显著展宽, 质心位置受整体灰度分布影响趋于稳定, 导致误差接近算法极限, 差异被算法性能极限掩盖。

为了模拟实际光学系统中的噪声, 对刃边角度为 5°, 高斯因子 σ = 1 退化后的刃边图像分别添加信噪比(signal-to-noise ratios, SNR)为 60 dB、50 dB、40 dB 高斯随机噪声, 如图 6 所示。对添加高斯噪声后的图片进行边缘角度检测, 计算结果如表 2 所示。

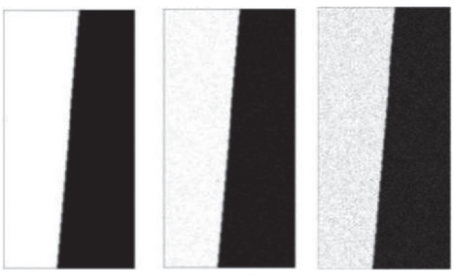


图 6　添加不同 SNR 噪声后的刃边图像

Fig. 6　Edge images after adding noises at different SNR

表 2　不同信噪比质心法和阈值法角度检测结果

Table 2　Angle detection results of centroid method and threshold method at different signal-to-noise ratios

信噪比/(dB)	质心法/(°)	相对误差/%	阈值法/()	相对误差/%
0	4.44	11.24	4.89	2.14
60	4.48	10.30	4.78	4.37
50	4.43	11.50	4.77	4.44
40	3.89	22.14	4.74	5.11

通过对比可知, 随着 *SNR* 降低, 质心法检测精度越低, 在 40 dB 时相对误差高达 22%。而优化后的阈值法在添加噪声后, 相对误差只有 5% 左右, 表现出了较好的抗噪性。

为了进一步验证优化后的方法的稳定性, 分别制作添加 60 dB、50 dB、40 dB 信噪比的随机噪声图像各 100 张, 分别使用质心法和优化后的阈值法进行检测, 检测结果绘制成误差箱线图, 如图 7 所示。

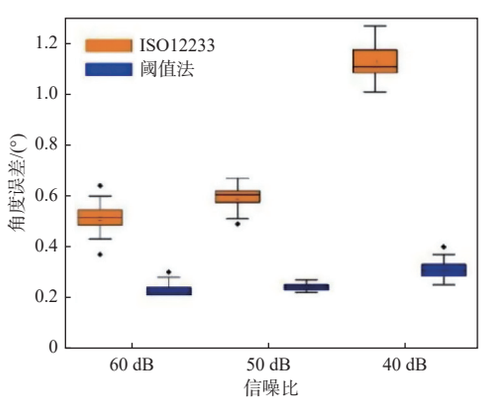


图 7　添加不同信噪比噪声后的 100 张 5°刃边图像检测角度误差分布图

Fig. 7　Distribution of angle detection errors for 100 sheets of 5° edge images after adding noise at different SNR levels

从图 7 可以看出, 在添加噪声的情况下, 对于信噪比越小的刃边, 质心法的检测精度越低, 而优化后的阈值法仍表现出较好的抗噪性能, 在高噪声情况下仍能保持较好的检测精度。

2.2　刃边边缘数据拟合结果

在 Canny 算子结合 Otsu 阈值法边缘检测的基础上, 分别采用最小二乘法和 Bisquare 方法对边缘检测的数据进行线性拟合。为了能最大差异化显示数据拟合的对比结果, 分别选用退化高斯因子 σ = 0.5 和 σ =5 的刃边数据进行拟合, 结果如表 3 所示。

表 3　最小二乘法和 Bisquare 方法对边缘数据拟合结果对比

Table 3　Comparison of edge data fitting results using least square and Bisquare methods

高斯因子	刃边角度/(°)	最小二乘法/(°)	相对误差/%	Bisquare/(°)	相对误差/%
$\sigma=0.5$	5	4.76	4.62	4.77	4.64
	10	9.34	6.58	9.34	6.58
	15	15.79	5.24	15.79	5.24
	20	19.01	4.93	19.08	4.61
$\sigma=5$	5	4.17	16.63	5.14	2.81
	10	8.74	12.58	9.93	0.65
	15	12.60	15.99	15.70	4.67
	20	17.54	12.32	19.05	4.75

从表 3 可知, 在退化高斯因子 σ 值较低的情况下, 最小二乘法和 Bisquare 方法对数据的拟合结果都比较精准。在 σ 值较高的情况下, 最小二乘法拟合的相对误差均超过了 10%, 而 Bisquare 方法仍保持较高的拟合精准度, 依然能将相对误差控制在 5% 以内。这是因为 Bisquare 方法的鲁棒性更好, 可以减少个别异常数据对整体数据拟合的影响, 保持拟合的稳定性。

2.3　函数拟合求解 ESF 结果对比

对刃边角度为 5°, 信噪比为 60 dB, 不同退化程度的刃边图像进行阈值法边缘检测和 Bisquare 方法数据处理, 分别通过 Gaussian 函数模型、三次 Fermi 函数模型和 Hyperbolic 函数模型拟合获得 ESF 曲线, 采用偏差平方和 (sum of squared deviations, *SSD*) 作为评价指标来判断拟合精度, 结果如表 4 所示。*SSD* 计算了所有偏差的平方和, 消除了偏差符号的影响, 如式 (11) 所示。*SSD* 越小, 表明模型的预测值与实际观测值之间的偏差越小。

$$SSD=\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2 \tag{11}$$

此外, 对刃边角度为 5°, 退化高斯因子 σ = 1,

信噪比分别为 60 dB、50 dB、40 dB 的刃边图像进行同样的仿真计算，仿真结果如表 5 所示，ESF 曲线拟合效果如图 8 所示。

表 4 不同退化程度 5°刃边图像 3 种函数拟合结果的 *SSD*

Table 4 *SSD* of fitting results for 5° edge images with different degradation levels using three functions

函数类型	$\sigma=0.5$	$\sigma=1$	$\sigma=3$	$\sigma=5$	较Gaussian平均改进率/%
Gaussian函数	447.6	510.1	647.4	702.1	—
三次Fermi函数	437.1	504.7	640.5	700.6	1.17
Hyperbolic函数	444.6	511.3	645.2	701.8	0.2

表 5 不同退化程度 5°刃边图像在不同信噪比时 3 种函数拟合结果的 *SSD*

Table 5 *SSD* of fitting results for 5° edge images with different SNR levels using three functions

函数类型	60 dB	50 dB	40 dB	较Gaussian平均改进率/%
Gaussian函数	520.4	525.2	608.4	—
三次Fermi函数	507.4	510.7	607.4	1.81
Hyperbolic函数	513.5	520.9	613.5	0.44

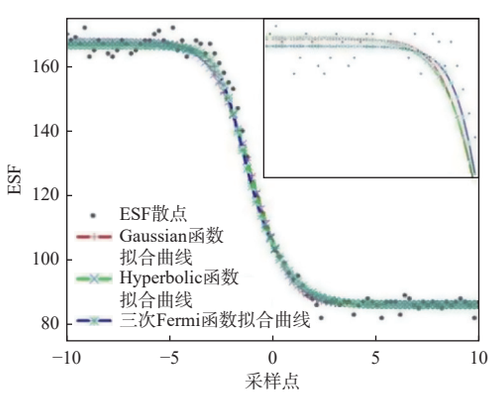


图 8 3 种函数模型 ESF 曲线拟合效果图

Fig. 8 Fitting effect diagram of ESF curves using three function models

表 4 和表 5 中以较 Gaussian 平均改进率(%)数据作为对比，计算公式如下：

$$\text{较Gaussian平均改进率} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{SSD_{\text{Gaussian}}(i)-SSD_{\text{target}}(i)}{SSD_{\text{Gaussian}}(i)}\right)\times 100\% \quad (12)$$

式中，$SSD_{\text{target}}(i)$ 为对应的三次 Fermi 函数模型和 Hyperbolic 函数模型拟合曲线的 *SSD* 值。

ISO12233 算法和 3 种函数模型获得的 LSF 曲线对比图如图 9 所示。对上述 ESF 散点采用 ISO12233 算法流程进行汉明窗处理，并进行求导获得 ISO12233 LSF 曲线。同时，对 3 种函数拟合的 ESF 曲线进行求导，分别获得 LSF 曲线。

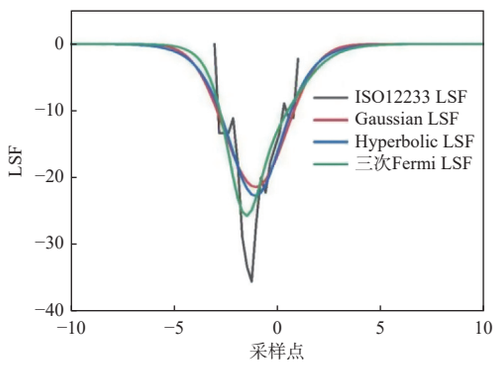


图 9 ISO12233 算法和 3 种函数模型获得的 LSF 曲线对比图

Fig. 9 Comparison of LSF curves obtained by ISO12233 algorithm and three function models

仿真实验结果凸显了三次 Fermi 函数在拟合 ESF 时相较于其他函数的优势。从图 8，表 4 和表 5 可知，得益于三次 Fermi 函数卓越的可导性和连续性，不仅显著降低了成像系统中 ESF 曲线的噪声误差，还有效抵消了由刃边图像灰度不均匀引发的噪声干扰，进而有效消除了 ESF 曲线末端的振荡现象。从图 9 可以看出，三次 Fermi 函数拟合的 ESF 曲线使 LSF 曲线更加平滑，避免了 ISO12233 LSF 曲线在识别极值点时的误判，直接提升了 LSF 计算的精确度，显著优化了镜头模组 MTF 值的评估过程。因此，三次 Fermi 函数在 ESF 曲线参数拟合方面的应用不仅提高了分析的精度和可靠性，也为计算镜头模组 MTF 值提供了一种高效、精确的手段。

3 测试结果分析与评价

为了更好地展示 ISO12233 算法和优化算法在检测精度上的差异性，特意挑选了一颗 ISO12233 算法检测为不良品，而优化后算法检测为良品的镜头。单颗镜头对比测试结果如表 6 所示。从不同视场位置的两种方法测试结果对比可以看出，在轴上视场角，ISO12233 的方法测试得到的结果和优化后的方法都能成功检测出镜头符合达标值。但是随着视场角的增加，受到光学畸变的影响，刃边图像的质量变差，ISO12233 在处理此类刃边图像时所得到的数据已经和实际 MTF 数据产生较大差异，随着视场角越大，差异越大。但是，优化后的方法仍可以保持一个较好的检测效果，从而降低生产线良品的漏检率。

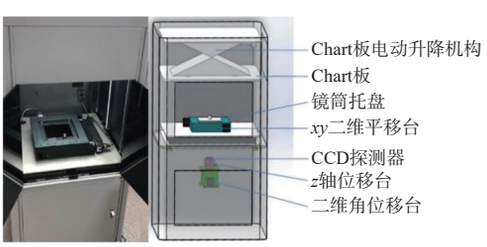
表 6　单颗镜头 ISO12233 和优化后刃边法 MTF 测试结果对比

Table 6　Comparison of MTF test results for single lens using ISO12233 and optimized edge method

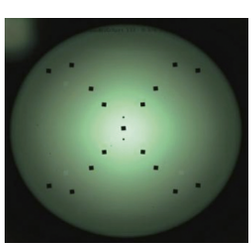
lp·mm^{-1}

视场方向	轴上视场	0.3轴外视场	0.5轴外视场	0.7轴外视场	0.8轴外视场
ISO子午	66.7	54.1	46.8	36.6	33.7
ISO弧矢	66.7	54.2	46.7	36.6	33.7
优化子午	69.8	60.1	52.1	42.5	40.1
优化弧矢	69.8	60.1	52.2	42.5	40.2
达标值	66	56	47	39	37

为了验证优化算法的准确性, 利用自主开发的 MTF 在线测试系统进行对比实验验证, 测试系统如图 10(a) 所示。在线测试是镜头生产过程中必不可少的成像质量检测环节, 每一颗组装完成的镜头均需通过 MFT 测试进行筛选, 挑选出成像质量达标的良品镜头。MTF 检测仪采用正投影方式, 主体结构自上而下分别为: Chart 板、镜头托盘、*xy* 二维平移台、CCD 探测器、*z* 轴位移台和二维角位移台。被测镜头放置在 10×10 穴的镜头托盘中, 通过电动升降台调节 Chart 板位置至被测镜头成像范围; 控制 *xy* 二维平移台, 使被测镜头移动到 Chart 板中心正下方位置, 并对上方 Chart 板图像成像; 下方 CCD 接收图像, 通过图像识别和软件控制, 使 *z* 轴位移台带动 CCD 移动到被测镜头像方焦面, 实现自动对焦; 于此同时, 调节二维角位移台, 使 CCD 平面与被测镜头像面平行, 避免由于平行度误差引入的 MTF 测量误差; 最后通过对 Chart 图像的解析获得 MTF 曲线, 从而判断被测镜头的成像质量。



(a) MTF测试系统



(b) Chart图

图 10　自主开发的 MTF 测试系统和拍摄的 Chart 图样

Fig. 10　Self-developed MTF testing system and captured chart pattern

数据处理平台采用 Intel Core i7-12700H 处理器, 优化算法从图像采集到 MTF 计算完成耗时约为 0.5 s。ISO12233 算法耗时同样也约为 0.5 s, 但由于其检测精度存在问题, 导致合格品漏检问题严重, 从而降低了生产效率。每颗镜头从移动、自动对焦、图像采集到获得 MTF 曲线整个过程平均在 3 s 内完成。

选择由德国 TRIOptics 公司开发的 ImageMaster PRO 10 MTF 检测仪器测试通过的 100 颗 A 类规格手机前置镜头, 在自主 MTF 检测仪器下进行检测。拍摄的 Chart 图如图 10(b) 所示, 相机在实际工作中采集 1 帧图像。通过轴上中心视场和轴外 0.3、0.5、0.7、0.8 多个位置的刃边图像, 计算在 30 lp/mm 频率处的 MTF 值, 将 ISO12233 刃边法和本文采用的优化刃边法测试结果与 A 类样品 MTF 达标值进行对比。

采用优化算法检测 100 颗 A 类镜头的 MTF 数据描绘的误差箱线图如图 11 所示。由图 11 可以看出, 在不同视场角下, 获得的 MTF 值均大于 A 类产品的达标值, 说明优化算法可有效地检测出镜头均属于 A 类产品, 和实际条件相符, 可以用于实际光学镜头质量检测。

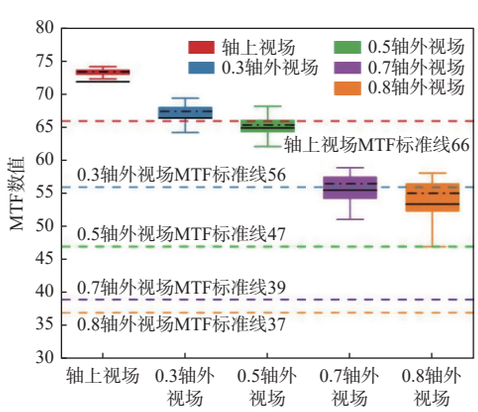


图 11　100 颗 A 类镜头不同视场角下的 MTF 检测结果和标准线对比

Fig. 11　Comparison of MTF test results and standard lines for 100 class A lenses at different field angles

4　结论

针对消费级镜头的 MTF 特性(高频衰减、视场依赖性、噪声敏感性), 分析了传统刃边法中边

缘检测、数据拟合、求解 ESF 三大关键步骤中容易产生误差，从而导致 MTF 检测结果不准确的情况，通过 Canny-Otsu 边缘检测、Bisquare 鲁棒拟合及三次 Fermi 函数连续求导，系统性优化了刃边法。实验结果表明：与传统的质心法相比，优化算法的的抗噪性能、视场适应性以及高频保留能力得到了显著提高。通过 ISO12233 算法和优化算法检测手机镜头 MTF 的对比实验，验证了优化后的算法更准确且适用于消费级镜头在线批量检测，尤其在低光照度、大视场及高分辨率场景中应用更适应。

参考文献：

[1] 雷玉堂. 现代安防视频监控系统设备维护与维修[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018: 1-5.
LEI Yutang. Modern security video surveillance system equipment maintenance and repair[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018: 1-5.

[2] 苗清然, 王海霞, 于洋, 等. 光学相干层析成像在指尖生物特征识别中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(8): 217-230.
MIAO Qingran, WANG Haixia, YU Yang, et al. Application of optical coherence tomography in fingertip biometrics[J]. Laser Optoelectronics Progress, 2023, 60(8): 217-230.

[3] 谷俊达, 向阳. 电子内窥镜光学系统设计[J]. 长春理工大学学报 (自然科学版), 2015, 38(2): 18-20.
GU Junda, XIANG Yang. Optical system design of electronic endoscope[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 38(2): 18-20.

[4] 叶松, 于新宇, 甘戈, 等. 星载多光谱相机成像系统设计与实现[J]. 光学学报, 2023, 43(24): 200-211.
YE Song, YU Xinyu, GAN Ge, et al. Design and implementation of spaceborne multispectral camera imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(24): 200-211.

[5] 范志刚, 张旺, 陈守谦. 光电测试技术[M]. 第 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2015: 50-72.
FAN Zhigang, ZHANG Wang, CHEN Shouqian. Optoelectronic testing technology[M]. 3th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 50-72.

[6] International Organization for Standardization. International standard ISO12233: Photography —electronic still picture imaging —resolution and spatial frequency responses, 2023[B]. Switzerland: ISO, 2003.

[7] BURNS P D. Slanted-edge MTF for digital camera and scanner analysis[C]// Proc. IS&T 2000 PICS Conference, 2000. NY USA: Rochester, 2000: 135-138.

[8] BURNS P D, WILLIAMS D, GRIFFITH J, et al. Application of ISO standard methods to optical design for image capture[J]. Electronic Imaging, 2020, 32: 1-7.

[9] XIE X, FAN H, WANG H, et al. Error of the slanted edge method for measuring the modulation transfer function of imaging systems[J]. Applied Optics, 2018, 57(7): B83-B91.

[10] 钱其豪. 基于调制传递函数的高端封装装备镜头质量检测与评价[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
QIAN Qihao. Inspection and evaluation of lens quality for high-end packaging equipment based on modulation transfer function[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.

[11] SAETIEW J, SANJAE J, MEEMON P. Real-time assessment of spectrometer alignment using modulation transfer function (MTF) measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 175: 108021.

[12] ZHANG Xiaolin, DU Guohao, DENG Biao, et al. High precision measurement of modulation transfer function for X- ray CCD with knife-edge method[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1680-1687.

[13] 袁航飞, 郭永飞, 司国良, 等. 正态分布模拟倾斜刃边图像的 MTF 测量方法[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0712001-1-10.
YUAN Hangfei, GUO Yongfei, SI Guoliang, et al. MTF measurement method based on slanted-edge image simulated by normal distribution[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0712001-1-10.

[14] 李航, 颜昌翔, 邵建兵, 等. 基于改进倾斜刃边法的光电成像系统 MTF 高准确度测试[J]. 光子学报, 2016, 45(12): 76-83.
LI Hang, YAN Changxiang, SHAO Jianbing, et al. High accuracy measurement of the MTF of electro-optical imaging system based on modified slanted-edge method[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(12): 76-83.

[15] TANAKA M, ANDO T, HORIUCHI T. Automatic MTF conversion between different characteristics caused by imaging devices[J]. Journal of Imaging, 2024, 10(2): 49.

[16] MASAOKA K, YAMASHITA T, NISHIDA Y, et al. Modified slanted-edge method and multidirectional modulation transfer function estimation[J]. Optics Express,

2014, 22(5): 6040-6046.

[17] 董英娟, 郭华金, 杜子学, 等. 基于 Canny 算子边缘检测技术的光学图像 MTF 测试[J]. 自动化与仪器仪表, 2022(8): 258-262.
DONG Yingjuan, GUO Huajin, DU Zixue, et al. Optical image MTF test based on canny operator edge detection technology[J]. Automation & Instrumentation, 2022(8): 258-262.

[18] 黄怡静, 胡小平, 彭向前, 等. 改进 Canny 算子的图像边缘检测算法[J]. 机械科学与技术, 2025, 44(9): 1612-1621.
HUANG Yijing, HU Xiaoping, PENG Xiangqian, et al. Image edge detection algorithm with improved canny operator[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2025, 44(9): 1612-1621.

(上接第 348 页)

[16] GUO M H, CAI J X, LIU Z N, et al. Pct: point cloud transformer[J]. Computational Visual Media, 2021, 7(2): 187-199.

[17] MENG X, LU X, YE H, et al. A new self-augment CNN for 3D point cloud classification and segmentation[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2024, 15(3): 807-818.

[18] YU X, TANG L, RAO Y, et al. Point-bert: pre-training 3d point cloud transformers with masked point modeling[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2022: 19313-19322.

[19] DOVRAT O, LANG I, AVIDAN S. Learning to sample[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Long Beach: IEEE, 2019: 2760-2769.

[20] LI X , WU X , LU H , et al. Channel-wise gated Res2Net: towards robust detection of synthetic speech attacks[J]. Electrical Engineering and Systems Science, 2021, 10(4): 1-11.

[21] WU Z, SONG S, KHOSLA A, et al. 3D shapenets: a deep representation for volumetric shapes[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Boston: IEEE, 2015: 1912-1920.

[22] YI L, KIM V G, CEYLAN D, et al. A scalable active framework for region annotation in 3d shape collections[J]. ACM Transactions on Graphics (ToG), 2016, 35(6): 1-12.

[23] HAN X F, JIN Y F, CHENG H X, et al. Dual transformer for point cloud analysis[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2022, 25: 5638-5648.

[24] 兰红, 陈浩, 张蒲芬. 集图卷积和三维方向卷积的点云分类分割模型[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(8): 10.
LAN Hong, CHEN Hao, ZHANG Pufen. Point cloud classification and segmentation model based on set graph convolution and 3D directional convolution[J]. Journal of Computer Engineering & Applications, 2023, 59(8): 10.