

基于针孔成像像面参数提取的单板机镜头显微成像质量评价方法

李博 王方 吕浩文 吴伟 魏航信

Method of microscopic imaging quality evaluation for board lens based on image parameter extraction of pinhole imaging

LI Bo, WANG Fang, LYU Haowen, WU Wei, WEI Hangxin

引用本文:

李博, 王方, 吕浩文, 等. 基于针孔成像像面参数提取的单板机镜头显微成像质量评价方法[J]. *应用光学*, 2021, 42(5): 839–847. DOI: 10.5768/JAO202142.0502003

LI Bo, WANG Fang, LYU Haowen, et al. Method of microscopic imaging quality evaluation for board lens based on image parameter extraction of pinhole imaging[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(5): 839–847. DOI: 10.5768/JAO202142.0502003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0502003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

无透镜显微成像的重构算法研究

Research on reconstruction algorithm of lensless microscopic imaging

应用光学. 2019, 40(4): 589–595 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0402002>

高清针孔镜头光学系统设计

Design of high-definition pinhole lens optical system

应用光学. 2021, 42(2): 223–228 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0201003>

AOTF成像光谱仪声光晶体光谱传递函数的研究

Study on spectral transfer function based on dual AOTF acousto-optic crystal

应用光学. 2019, 40(2): 202–209 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0201004>

基于成像矩阵的物数据求解方法

Solving method of object data based on imaging matrix

应用光学. 2018, 39(1): 40–44 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0101007>

空间外差拉曼光谱仪成像镜头光机热集成分析

Thermal/ structural/optical integrated analysis on spatial heterodyne Raman spectrometer imaging lens

应用光学. 2018, 39(3): 332–338 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0301006>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2021) 05-0839-09

基于针孔成像像面参数提取的单板机镜头 显微成像质量评价方法

李 博, 王 方, 吕浩文, 吴 伟, 魏航信

(西安石油大学 机械工程学院, 陕西 西安 710065)

摘 要: 提出以针孔成像调制传递函数面积 (MTFA) 和 MTFA 相对变化率作为像面参数, 定量评价单板机镜头的显微成像质量。采用针孔法获取不同视场位置的光斑图像, 以提取单板机镜头显微成像系统的调制传递函数 (MTF); 建立单板机镜头透镜组的 MTF 数学模型, 提取边缘视场弧矢方向与子午方向的 MTFA 和 MTFA 相对变化率, 用于度量被测镜头显微成像清晰度与像面平整度。开展了单板机镜头测试实验, 采用论文提出的模型方法定量评价被测镜头显微成像性能, 结果表明, Lens2 镜头可获得最佳显微成像质量。计算被测镜头 RGB 点阵图像的平均功率谱 (APSV)、灰度平均梯度 (GMG) 及拉普拉斯算子和 (LS), 结果显示 Lens2 点阵图像的 APSV、GMG 及 LS 参数值最大分别为 2.7202、17.0244 及 94.9212, 且点阵图像清晰度最高, 与像面参数评价结果相符, 表明论文提出的方法用于定量评价单板机镜头显微成像性能是准确有效的, 对提高在线图像可视铁谱 (OLVF) 探头设计具有重要意义和工程价值。

关键词: 单板机镜头; 针孔法; 显微成像; 调制传递函数面

中图分类号: TN206; O439

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202142.0502003

Method of microscopic imaging quality evaluation for board lens based on image parameter extraction of pinhole imaging

LI Bo, WANG Fang, LYU Haowen, WU Wei, WEI Hangxin

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyu University, Xi'an 710065, China)

Abstract: The modulation transfer function area (MTFA) of pinhole imaging and the MTFA relative variation ratio were used as the image surface parameters to quantitatively evaluate the microscopic imaging quality of the board lens. The light spot images located in different fields of view positions were obtained by using the pinhole imaging method to extract the modulation transfer function (MTF) of microscopic imaging system for board lens. The MTF mathematical model of lens system for board lens was established, and the MTFA in sagittal direction and meridian direction of edge field of view as well as the MTFA relative variation ratio were extracted to measure the microscopic imaging definition and image surface flatness of the measured lens. An experiment which was for measuring the board lens was carried out, and the microscopic imaging performance of the measured lens was quantitatively evaluated by using the proposed model and method. The results show that the Lens 2 can obtain the optimal microscopic imaging quality. The definition value of average power spectrum value (APSV), the gray mean gradient (GMG) and the laplacian summation (LS) were calculated respectively from the RGB bitmap images captured by these measured lens. The results show that the

收稿日期: 2021-01-21; 修回日期: 2021-05-07

基金项目: 陕西省自然科学基金 (2021JM-405)

作者简介: 李博 (1984—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光学传感器及仪器技术, 图像处理方法, 机械结构摩擦磨损机理及智能控制与故障诊断等研究。E-mail: libo@xsyu.edu.cn

通信作者: 吴伟 (1961—), 男, 博士, 教授, 主要从事智能控制与故障诊断, 机械设计及理论研究。E-mail: wuwei@xsyu.edu.cn

maximum parameter value of the APSV, GMG and LS of Lens 2 bitmap images is equal to 2.720 2, 17.024 4 and 94.921 2, respectively. At the same time, the bitmap images have the highest definition, which is consistent with the image surface parameter evaluation results, indicating that the proposed method used in the quantitative evaluation of microscopic imaging performance of board lens is accurate and effective, which is of great significance and engineering value to improve the online image probe design of the on-line visual ferrograph (OLVF).

Key words: board lens; pinhole imaging method; microscopic imaging; modulation transfer function area

引言

机器视觉的显微成像技术可用于微小物体表面形态的观测与分析^[1],广泛应用于生物医学、工业生产与加工以及航天探测领域。Michael C 等人采用显微成像技术研究解吸电喷雾电离中玻璃表面的样本移除问题^[2]; Nada N 等人利用该技术研究光的散射成像,并将其应用于细胞组织结构分析与临床诊断等领域^[3-4]; Kim 等人利用该技术提出采用一种显微成像系统实时监测热转换设备中的 CaCO₃ 污垢处理过程^[5]; Kassim 等人通过显微成像获得机加工件表面纹理图像,用于分析研究刀具磨损程度^[6]; Liam Pedersen 等人将显微成像技术应用于火星探测器,对火星上的土壤和岩石表面的形态纹理进行观测与分析^[7]。然而,上述研究多采用专业显微物镜配合高性能电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)实现高质量显微成像^[8],尽管像差小、成像质量高,但它们的结构复杂,光路长且体积大,仅限于实验室环境下离线使用,难以适用于工业现场狭小空间的在线应用。单板机镜头可实现狭小空间内短光路、低倍率显微成像,采用这类镜头设计在线图像可视铁谱(on-line visual ferrograph, OLVF)探头,具有体积小、结构紧凑等特点,可被安装于装备油液循环系统的管路中,进行磨粒视觉特征获取与磨损过程在线监测^[9-10]。目前,缺乏单板机镜头显微成像质量定量评价方法,OLVF 探头难以获得较高清晰度磨粒图像,严重制约了 OLVF 技术发展。

场曲像差是影响单板机镜头显微成像质量的主要因素,现有近轴成像场曲与畸变模型均以镜头透镜组光学结构参数为基础进行建模评价^[11-12],通过 ImageMaster 光学测试仪器测量场曲像差,进而评价光学镜头的成像性能。调制传递函数(modulation transfer function, MTF)作为定量描述线性不变系统成像性能的一个基本物理量^[13],可反映光学系统信息传递能力,用于客观评价成像性能^[14]。

Chao.C 等人利用在线光学测试设备获取手机镜头模组 MTF^[15]; Lengwenus 等人利用狭缝法获取红外光学镜头 MTF^[16]; Samei 与 Micheal 提出采用刃边法获得 MTF 用于评价 X 光照相成像系统性能^[17]; Liu 等人采用 MTF 定量分析离焦距对大景深显微物镜成像质量的影响^[18],证明了 MTF 方法可用于评价光学镜头性能的可靠性和准确性。尽管这些方法客观准确,但都以镜头光学结构参数和专业测试仪器为支撑,只适用于长光路光学镜头成像质量评价,难以满足小体积、短光路单板机镜头显微成像性能定量评价要求,因此需要专用的测试与评价手段解决 OLVF 显微镜头选型问题。

为了定量评价单板机镜头显微成像质量,利用针孔法分别获取不同像场位置的光斑图像,基于 MTF 理论计算单板机镜头倒置使用时显微成像测试系统总的 MTF。建立了镜头透镜组 MTF 数学模型,提取边缘视场 MTFA(modulation transfer function area)和 MTFA 相对变化率作为像面参数,用于评价单板机镜头成像清晰度与像面平整度。不同倍率条件下,提取 4 款被测单板机镜头的像面参数进行对比分析,确定最佳 OLVF 显微镜头。利用被测镜头分别获取 RGB 点阵图像,采用平均功率谱(average power spectrum value, APSV)、灰度平均梯度(gray mean gradient, GMG)及拉普拉斯算子和(laplacian summation, LS)评价点阵图像清晰度,验证本文方法用于单板机镜头显微成像质量定量评价的准确性和有效性。

1 显微成像系统 MTF 获取

单板机镜头显微成像测试系统结构如图 1 所示。白光 LED 平板光源作为透射光源,平板光源上方有星点靶标,光线透过星点靶标的微米级圆孔产生目标光源,星点靶标固定在 X-Y 方向定位台上。单板机镜头倒置安装于调焦机构中,被测镜头入瞳作为系统出瞳,CMOS 传感器位于调焦机构

上方, 光线通过单板机镜头透镜组与出瞳对焦后在 CMOS 像面上形成放大的光斑。

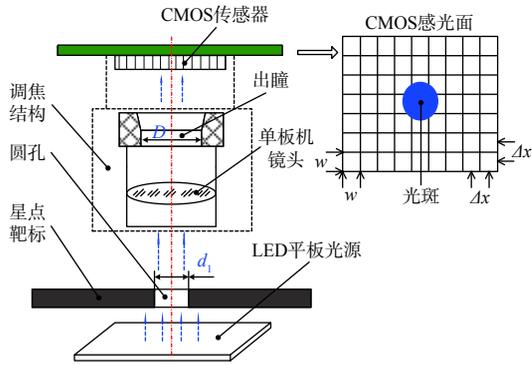


图 1 显微成像系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of microscopic imaging system

测试之前需调整成像系统放大倍率, 然后调节 X-Y 轴精密定位台, 使光斑位于 CMOS 像面中心视场与边缘视场不同位置, 获取光斑图像, 并求取 MTF, 提取方法流程图如图 2 所示。

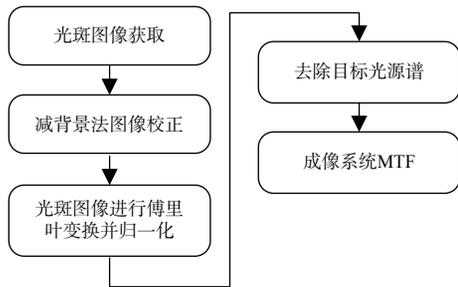
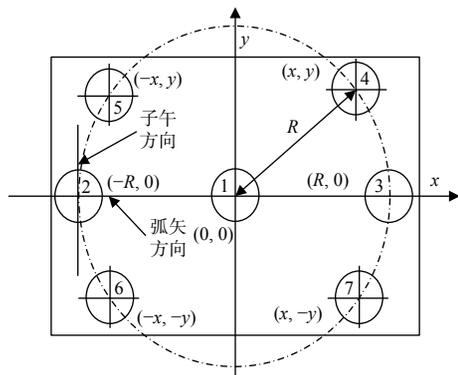


图 2 MTF 提取方法

Fig. 2 MTF extraction method

1) 如图 3 所示, 移动星点靶标, 使目标光斑位于图像几何中心(0, 0)位置, 像面对焦确保光斑直径最小, 获得中心视场位置的光斑图像;



1. 中心视场光斑; 2~7. 边缘视场光斑

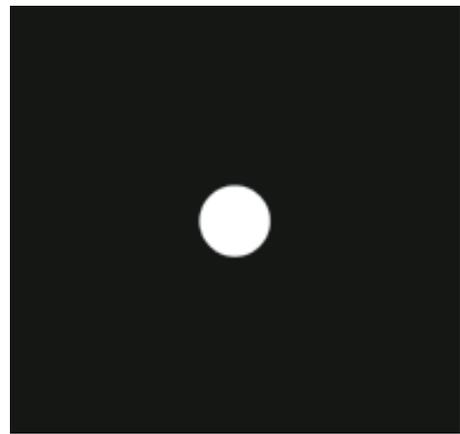
图 3 CMOS 像面光斑分布示意图

Fig. 3 Distribution diagram of CMOS image spot

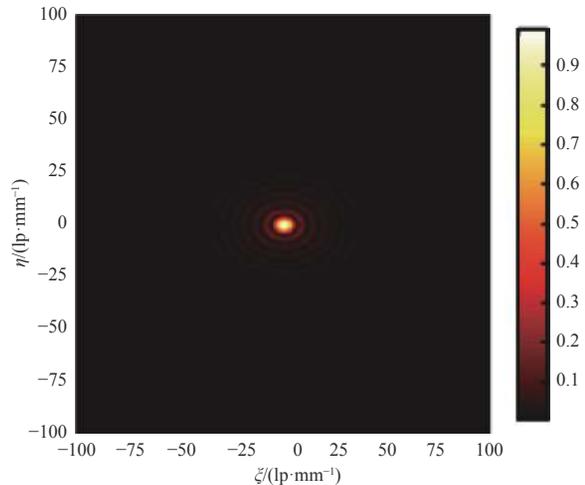
2) 以图像几何中心为坐标参考点, 沿 x 轴方向移动光斑至边缘视场(R, 0)位置, 以图像几何中心为圆心、R 为半径做圆, 在圆周上选取 n 个坐标点, 将光斑移至各个坐标点位置, 依次捕获不同视场位置的光斑图像, 并采用减背景法对光斑图像进行修正;

3) 进行傅里叶变换获得光斑图像的像面谱, 在空间频域内归一化处理像面谱, 从中去除目标光源频谱, 最后对所得结果进行取模运算求得单板机镜头显微成像系统的 MTF。

针孔法获得的中心视场光斑图像如图 4(a)所示。



(a) 光斑图像



(b) 归一化 F_{MTFmax} (ξ, η) 二维图 ($\beta=1.5$)

图 4 光斑图像 MTF 提取

Fig. 4 MTF extraction of spot image

假设镜头测试系统具有线性及空间不变性, 系统的点扩展函数 (point spread function, PSF) 为 $F_{PS}(x, y)$, 目标光斑为 $f(x, y)$, 光斑图像为 $g(x, y)$, 那么 $g(x, y)$ 可表示为 $f(x, y)$ 与 $F_{PS}(x, y)$ 之卷积, 忽略随机噪声干扰, 即有:

$$g(x,y) = \int f(\xi,\eta)F_{PS}(x-\xi,y-\eta)d\xi d\eta = f(x,y) * F_{PS}(x,y) \quad (1)$$

对(1)式进行二维傅里叶变换,令 $F_{MTmeas}(\xi,\eta)$ 为成像系统总的MTF,由卷积理论可得到 $F_{MTmeas}(\xi,\eta)$ 为

$$F_{MTmeas}(\xi,\eta) = |\mathcal{F}\{F_{PS}(x,y)\}| = \frac{|G(\xi,\eta)|}{|F(\xi,\eta)|} \quad (2)$$

式中: ξ,η 为空间频率; $G(\xi,\eta)$ 为光斑像面谱; $F(\xi,\eta)$ 为目标光源频谱,分别对两者进行归一化处理。已知 CMOS 像面分辨率为 $M \times N$,空间频域内移动 $G(\xi,\eta)$ 坐标至 $G(\xi - M/2, \eta - N/2)$, $F(\xi,\eta)$ 归一化之后可用 BESINC 函数表示^[19],等价于目标光源引入的 MTF。令目标光源孔径为 d_1 ,成像系统放大倍率为 β ,则成像系统 $F_{MTmeas}(\xi,\eta)$ 可表示为

$$F_{MTmeas}(\xi,\eta) = \left| \frac{G\left(\xi - \frac{M}{2}, \eta - \frac{N}{2}\right) \pi \beta d_1 \sqrt{\xi^2 + \eta^2}}{2J_1(\pi \beta d_1 \sqrt{\xi^2 + \eta^2}) G(0,0)} \right| \quad (3)$$

式中: $J_1(x)$ 为一阶 Bessel 函数,可表示为

$$J_1(x) = -2/\pi x \cdot \int_1^\infty \sin(xu)/(u^2 - 1)^{3/2} du \quad (4)$$

利用(3)式对图4(a)进行处理,分别求取不同像场位置光斑图像所对应的 $F_{MTmeas}(\xi,\eta)$,当 $d_1 = 0.1 \text{ mm}$ 时,在 $\xi \in [-100, 100]$ 和 $\eta \in [-100, 100]$ 区间内的归一化 $F_{MTmeas}(\xi,\eta)$ 如图4(b)所示。为了实现单板机镜头显微成像质量评价,需确定镜头透镜组 MTF,以提取评价参数。

2 像面参数提取

单板机镜头显微成像系统主要由 CMOS 图像传感器和镜头子系统组成,显微成像质量受到镜头透镜组、系统出瞳、CMOS 像元尺寸以及传感器采样间隔共同影响,这些因素会造成目标光源成像质量下降。构建的系统成像模型如图5所示。假设成像系统总的的光学传递函数(optical transfer

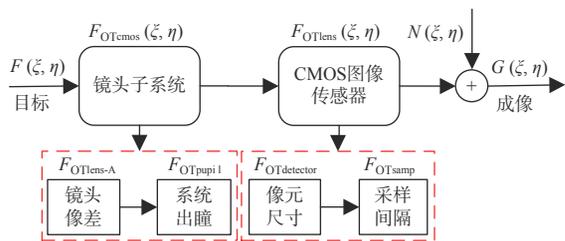


图5 系统成像模型

Fig. 5 System imaging model

function, OTF)为 $F_{OTmeas}(\xi,\eta)$,若忽略 CMOS 相邻像素单元串扰的影响,则可表示为 $G(\xi,\eta)$ 与 $F(\xi,\eta)$ 的比值,即为

$$F_{OTmeas}(\xi,\mu) = F_{OTCMOS}(\xi,\mu) \times F_{OTlens}(\xi,\mu) + \frac{N(\xi,\mu)}{F(\xi,\mu)} \quad (5)$$

式中: $F_{OTCMOS}(\xi,\eta)$ 为 CMOS 传感器的 OTF; $F_{OTlens}(\xi,\eta)$ 为镜头子系统的 OTF; $N(\xi,\eta)$ 为频域内随机噪声频谱函数。假设成像系统中的随机噪声很小(即有 $F(\xi,\mu) \gg N(\xi,\mu)$),对 $F_{OTmeas}(\xi,\eta)$ 取模可得到系统总的 $F_{MTmeas}(\xi,\eta)$ 为

$$F_{MTmeas}(\xi,\eta) = F_{MTcmos}(\xi,\eta) \times F_{MTlens}(\xi,\eta) \quad (6)$$

式中: $F_{MTlens}(\xi,\eta)$ 为单板机镜头子系统引入的 MTF; $F_{MTcmos}(\xi,\eta)$ 为 CMOS 传感器引入的 MTF,可表示为

$$F_{MTcmos}(\xi,\eta) = F_{MTdetector}(\xi,\eta) \times F_{MTsamp}(\xi,\eta) \quad (7)$$

式中: $F_{MTdetector}(\xi,\eta)$ 为 CMOS 像元尺寸引入的 MTF; $F_{MTsamp}(\xi,\eta)$ 为传感器采样间隔引入的 MTF。假设 CMOS 像元尺寸为 $w \times w$,感光区域对每个像素单元的填充系数为 100%,则像素孔径可表示为矩形函数 $p(x,y)$,则有:

$$p(x,y) = \text{rect}(x/w) \text{rect}(y/w) = \begin{cases} 1, & |x| \leq w/2, |y| \leq w/2 \\ 0, & \text{Others} \end{cases} \quad (8)$$

对(8)式进行傅里叶变换,可求得 $F_{MTdetector}(\xi,\eta)$ 为

$$F_{MTdetector}(\xi,\eta) = \left| \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} p(x,y) \exp[-j2\pi(\xi x/M + \eta y/N)] \right| = |\text{sinc}(\xi w)| \cdot |\text{sinc}(\eta w)| \quad (9)$$

式中 $\text{sinc}(x)$ 可表示为 $\sin(\pi x)/\pi x$ 。CMOS 像素单元越小,则同一频率的 $F_{MTdetector}$ 值越大,表明像面分辨率越高。设定 CMOS 像面沿 x,y 方向的采样间隔均为 Δx (图1所示),忽略像素阵列间隔,则可得空间频域内的 F_{MTsamp} 为^[20]

$$F_{MTsamp}(\xi,\eta) = |\text{sinc}(\xi \Delta x)| \cdot |\text{sinc}(\eta \Delta x)| \quad (10)$$

将(9)式和(10)代入(7)式,假设 CMOS 传感器的采样间隔等于像素单元的宽度(即为 $\Delta x = w$),由(6)式和(7)式可推导出 $F_{MTlens}(\xi,\eta)$ 为

$$F_{MTlens}(\xi,\eta) = \frac{F_{MTmeas}(\xi,\eta)}{\text{sinc}^2(\xi w) \cdot \text{sinc}^2(\eta w)} \quad (11)$$

单板机镜头可被看作是由入瞳和镜头透镜组2部分组成,镜头入瞳作为测试系统的出瞳,沿 ξ 与 η 方向分别提取测试镜头引入的一维 MTF,则 $F_{MTlens}(\xi,0)$ 和 $F_{MTlens}(0,\eta)$ 可分别表示为

$$\begin{cases} F_{MTlens}(\xi,0) = F_{MTpupil}(\xi) \times F_{MTlens-A}(\xi) \\ F_{MTlens}(0,\eta) = F_{MTpupil}(\eta) \times F_{MTlens-A}(\eta) \end{cases} \quad (12)$$

式中: F_{MTpupil} 为系统出瞳引入的 MTF; $F_{\text{MTlens-A}}$ 为镜头透镜组引入的 MTF。利用非相干成像系统光学传递函数计算理论, 对于具有圆形孔径的显微成像系统中心视场, 系统出瞳可产生艾里斑光强分布, 圆形出瞳引入的 $F_{\text{MTpupil-C}}(\xi)$ 可用衍射受限 MTF 表示^[21]:

$$AF_{\text{MTpupil-C}}(\xi) = \frac{2 \left[D \cos^{-1}(\lambda' \xi / D) - \lambda' \xi \sqrt{1 - (\lambda' \xi / D)^2} \right]}{\pi D} \quad (13)$$

式中: D 为系统圆形出瞳直径; D/λ' 即为空间截止频率。对于显微成像系统的边缘视场, 出瞳形状为椭圆。假设椭圆长短轴分别为 a 和 b , 那么边缘视场弧矢方向与子午方向引入的 $F_{\text{MTpupil-S}}(\xi)$ 和 $F_{\text{MTpupil-M}}(\eta)$ 可分别表示为

$$\begin{cases} F_{\text{MTpupil-S}}(\xi) = 1 - \lambda' \xi \cos \left[\sin^{-1}(\lambda' \xi / 2a) \right] / \pi a - \\ \quad 2 \sin^{-1}(\lambda' \xi / 2a) / \pi \\ F_{\text{MTpupil-M}}(\eta) = 1 - \lambda' \eta \cos \left[\sin^{-1}(\lambda' \eta / 2b) \right] / \pi b - \\ \quad 2 \sin^{-1}(\lambda' \eta / 2b) / \pi \end{cases} \quad (14)$$

式中: a 为出瞳直径的 $1/2$, 即 $a = D/2$; b 等于 $D \cos \theta / 2$, 其中 θ 为像方视场角。圆形光斑频谱具有良好的对称性, 可使频域内边缘视场弧矢方向与子午方向频率取值相等 (即有 $\xi = \eta$), 经过计算分析可得弧矢方向 MTF 和中心视场 MTF 完全相同^[22], 表明 $F_{\text{MTpupil-S}}(\xi)$ 与 $F_{\text{MTpupil-C}}(\xi)$ 相等。将 (13) 式和 (14) 式代入 (12) 式, 结合 (11) 式可推导出镜头透镜组所引入的边缘视场弧矢方向与子午方向的 MTF 分别为

$$\begin{cases} F_{\text{MTlens-S}}(\xi) = \frac{\pi F_{\text{MTmeas}}}{2 \sin^2(\xi w)} \cdot \left[\cos^{-1} \left(\frac{\lambda' \xi}{D} \right) - \right. \\ \quad \left. \frac{\lambda' \xi}{D} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda' \xi}{D} \right)^2} \right]^{-1} \\ F_{\text{MTlens-M}}(\xi) = \frac{\pi F_{\text{MTmeas}}}{\sin^2(\xi w)} \cdot \left\{ \pi - 2 \sin^{-1} \left(\frac{\lambda' \xi}{D \cos \theta} \right) - \right. \\ \quad \left. 2 \lambda' \xi \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{\lambda' \xi}{D \cos \theta} \right) \right] / D \cos \theta \right\}^{-1} \end{cases} \quad (15)$$

式中: λ 为 LED 平板光源的主波长; l' 为系统出瞳面到像面的距离。假设出瞳面与像方主平面重合, 当镜头焦距为 f 时, 则有 $l' = f(1 + \beta)$ 。其中 $\cos \theta$ 可表示为

$$\cos \theta = \frac{f(1 + \beta)}{\sqrt{f^2(1 + \beta)^2 + R^2}} \quad (16)$$

式中: R 为中心视场与边缘视场图像的光斑中心间

距 (见图 3 所示)。当 f 和 β 为恒定值时, R 值越大, $\cos \theta$ 越小。结合 (15) 式可见边缘视场弧矢方向的 $F_{\text{MTlens-S}}(\xi)$ 曲线宽度不变, 但子午方向的 $F_{\text{MTlens-M}}(\xi)$ 曲线变窄, 表明随着 θ 增大, 场曲像差随之增大, 图像清晰度降低。

采用调制传递函数面积 (modulation transfer function area, MTFA), 即 MTF 曲线与空间频率轴所围的面积值定量评价镜头显微成像质量^[23]。MTFA 值越大, 表明镜头所传递的信息量越多, 成像越清晰。 $F_{\text{MTlens-S}}(\xi)$ 与 $F_{\text{MTlens-M}}(\xi)$ 曲线所对应的弧矢方向 $A_{\text{MTFlens-S}}(\xi)$ 和子午方向 $A_{\text{MTFlens-M}}(\eta)$ 可分别表示为

$$\begin{cases} A_{\text{MTFlens-S}}(\xi) = \int_0^{\xi_{\text{cutoff}}} F_{\text{MTlens-S}}(\xi) d\xi \\ A_{\text{MTFlens-M}}(\xi) = \int_0^{\xi_{\text{cutoff}}} F_{\text{MTlens-M}}(\xi) d\xi \end{cases} \quad (17)$$

式中: ξ_{cutoff} 为空间截止频率, 其值等于 $D/\lambda f(1 + \beta)$ 。显微成像过程中, 由于单板机镜头存在场曲像差, 在图像中心视场对焦的情况下, 从中心向边缘视场的像面清晰度逐渐降低。引入 MTFA 相对变化率来度量镜头场曲变化量, 表征镜头显微成像的像面清晰度与平整性。首先利用 (17) 式分别计算如图 3 所示的 2~7 坐标位置光斑图像的边缘视场弧矢方向与子午方向的 MTFA, 求取 MTFA 平均值。令上述 6 个坐标位置光斑图像的弧矢方向 $A_{\text{MTFlens-S}}$ 平均值为 $\bar{\sigma}_{\text{AS}}$, 子午方向 $A_{\text{MTFlens-M}}$ 平均值为 $\bar{\sigma}_{\text{AM}}$, 则 MTFA 相对变化率 $\bar{\delta}$ 可表示为 $\bar{\sigma}_{\text{AM}}$ 与 $\bar{\sigma}_{\text{AS}}$ 相对减小量与放大倍率的比值, 即:

$$\bar{\delta} = \left| \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{\bar{\sigma}_{\text{AM}}(i)}{\bar{\sigma}_{\text{AS}}(i)} - 1 \right| / \beta \times 100\% \quad (18)$$

采用像面参数 $\bar{\sigma}_{\text{AS}}$ 、 $\bar{\sigma}_{\text{AM}}$ 和 $\bar{\delta}$ 定量表征单板机镜头显微成像质量。 $\bar{\sigma}_{\text{AS}}$ 和 $\bar{\sigma}_{\text{AM}}$ 值越大, 表明被测镜头的显微成像清晰度越高; $\bar{\delta}$ 值越小, 则说明被测镜头显微成像的场曲像差越小, 像面越平整, 边缘视场图像解析度越高。

3 实验结果与分析

选取焦距、光圈数与出瞳直径等光学参数相同的 4 款商业镜头作为被测镜头 (如图 6 所示), 对其进行显微成像质量评价测试。像面中心对焦情况下分别获取不同视场位置的光斑图像, 提取各个镜头的评价参数 $\bar{\sigma}_{\text{AS}}$ 、 $\bar{\sigma}_{\text{AM}}$ 和 $\bar{\delta}$, 对比显微成像质量评价参数, 确定最佳成像镜头。显微成像测试系统主要部件的参数指标如表 1 所示。



图6 被测镜头

Fig. 6 Tested board lens

表1 测试系统各部件参数

Table 1 Component parameters of test system

部件名称	规格参数
CMOS	1/4" CMOS, 分辨率为640×480像素, 像元尺寸6 μm×6 μm
4款镜头	焦距 $f = 8.0$ mm, 光圈数 $F^\# = 2.0$, 出瞳 $D = 5.0$ mm
星点靶标	透光圆孔直径 $d = 0.1$ mm
LED平板光源	主波长 $\lambda \approx 500$ nm

当 β 分别为1.5和2.0时,对被测镜头的显微成像质量进行测试,设置中心视场与边缘视场光斑位置的坐标间距 R 为0.8 mm,对不同视场位置的光斑图像进行傅里叶变换,根据(15)式计算空间频域内被测镜头的MTF曲线。当 $\beta=1.5$ 时,计算可得 $\xi \in [0, 100]$ 区间内镜头透镜组的 $F_{MTlens-S}(\xi)$ 和 $F_{MTlens-M}(\xi)$ 曲线如图7所示。

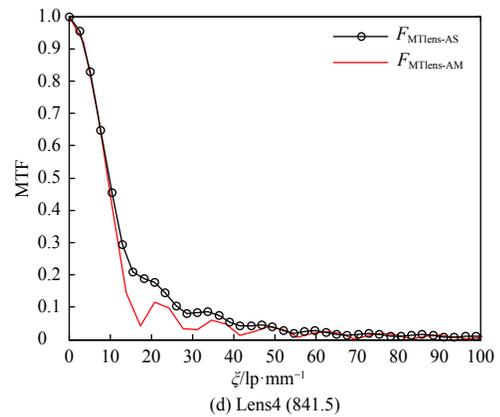
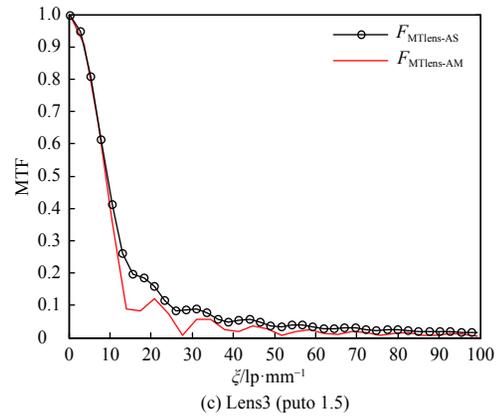
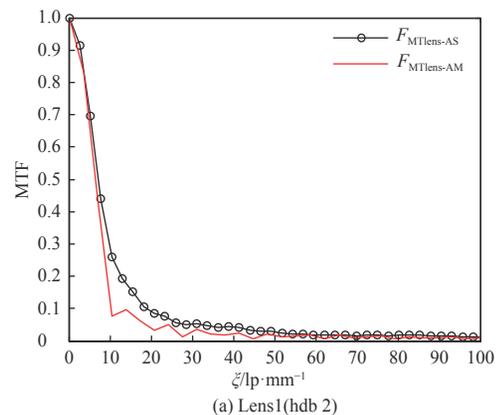
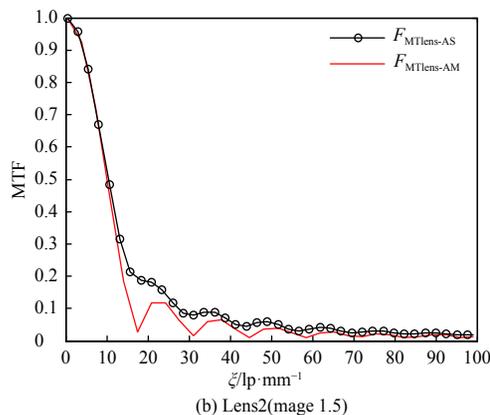
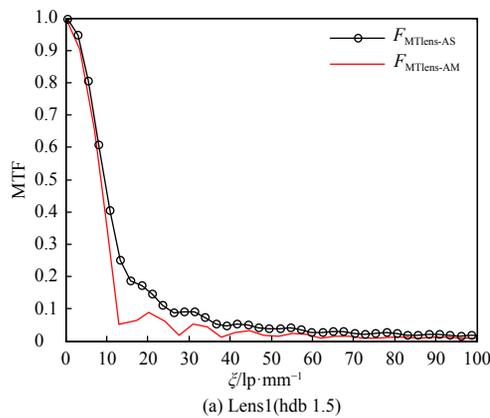


图7 镜头 $F_{MTlens-AS}(\xi)$ 和 $F_{MTlens-AM}(\eta)$ 曲线($\beta=1.5$)

Fig. 7 $F_{MTlens-AS}(\xi)$ and $F_{MTlens-AM}(\eta)$ curves of board lens ($\beta=1.5$)

改变成像系统光学放大倍率,当 $\beta=2.0$ 时, $\xi \in [0, 100]$ 区间内的 $F_{MTlens-AS}(\xi)$ 和 $F_{MTlens-AM}(\xi)$ 曲线如图8所示。

由图7和图8可见,随着 ξ 值的增大,MTF值逐渐减小,表明边缘视场的高频信息衰减严重,图像细节轮廓分辨率降低。当 $\xi \geq 10$ lp/mm时,同一频率下弧矢方向 $F_{MTlens-S}$ 与子午方向 $F_{MTlens-M}$ 存在较大的距离偏差,表明镜头存在场曲像差,因而影响边缘视场显微成像质量。当 β 增大时, $F_{MTlens-S}$ 与



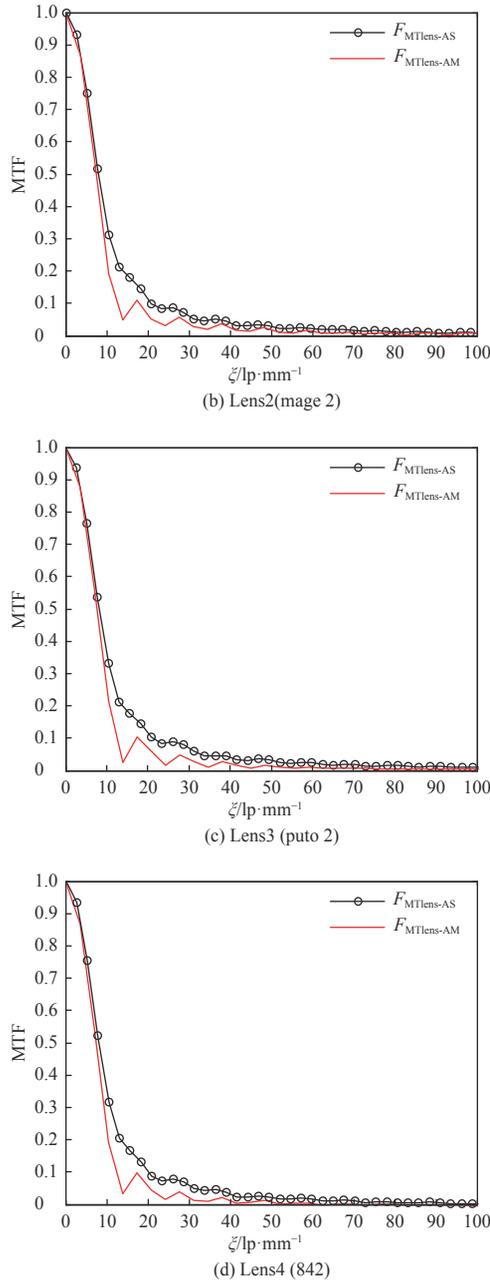


图 8 镜头 $F_{MTLens-AS}(\xi)$ 和 $F_{MTLens-AM}(\eta)$ 曲线 ($\beta=2.0$)

Fig. 8 $F_{MTLens-AS}(\xi)$ and $F_{MTLens-AM}(\eta)$ curves of board lens ($\beta=2.0$)

$F_{MTLens-M}$ 之间的距离偏差随之减小,表明视场范围内的场曲像差减小,边缘视场的图像解析度提高。利用(17)式和(18)式分别计算镜头显微成像质量评价参数 $\bar{\sigma}_{AS}$ 、 $\bar{\sigma}_{AM}$ 和 $\bar{\delta}$, 计算得到 4 款镜头评价参数值如表 2 所示。

由比表 2 可看出, Lens2 镜头的 $\bar{\sigma}_{AS}$ 和 $\bar{\sigma}_{AM}$ 具有最大值, 所对应的 $\bar{\delta}$ 值最小, 表明这款镜头获取图像的像面分辨率最高, 且具有最小的光学像差, 显微成像性能优于其他测试镜头, 更有利于磨粒清

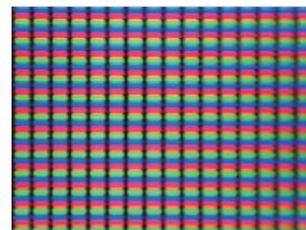
表 2 被测镜头评价参数值

Table 2 Evaluation parameter values of tested board lens

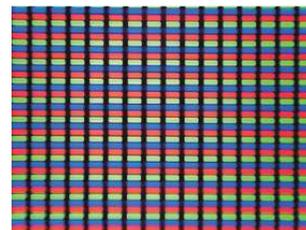
放大倍率	参数	指标			
		Lens1	Lens2	Lens3	Lens4
$\beta = 1.5$	$\bar{\sigma}_{AS}$	13.904 9	15.542 6	14.303 6	14.310 8
	$\bar{\sigma}_{AM}$	10.815 7	13.141 3	11.447 1	11.752 0
	$\bar{\delta}/\%$	13.89	10.53	12.48	11.92
$\beta = 2.0$	$\bar{\sigma}_{AS}$	11.603 0	12.122 4	11.744 5	11.932 9
	$\bar{\sigma}_{AM}$	8.594 3	9.568 6	8.964 6	9.175 8
	$\bar{\delta}/\%$	12.96	10.30	11.84	11.56

晰成像。2 种放大倍率条件下, 随着 β 值的增大, $\bar{\sigma}_{AS}$ 与 $\bar{\sigma}_{AM}$ 逐渐减小, 中心视场像面分辨率随之降低; β 值越大, $\bar{\delta}$ 值越小, 则表明增大 β 值有利于提高像面平整度和边缘视场目标像点的成像清晰度。

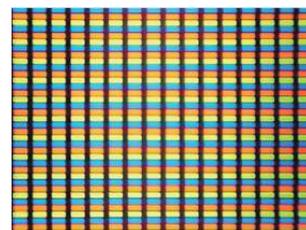
在 $\beta=2$ 的条件下, 利用这 4 款被测镜头分别获取像元尺寸为 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 的 RGB 点阵图像, 如图 9 所示。采用平均功率谱值 (average power spectrum value, APSV)、灰度平均梯度 (gray mean gradient, GMG) 及拉普拉斯算子和 (laplacian summation, LS) 3 种客观方法定量评价 RGB 图像的清晰度^[23-24], 以验证本文提出方法评价结果的正确性。假设 RGB 点阵图像中无噪声干扰, 傅里叶变换求取图像一维平均功率谱如图 10 所示。



(a) Lens1



(b) Lens2



(c) Lens3

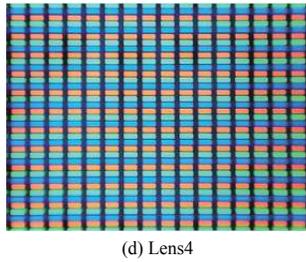


图9 镜头 RGB 点阵图像

Fig. 9 RGB bitmap image of board lens

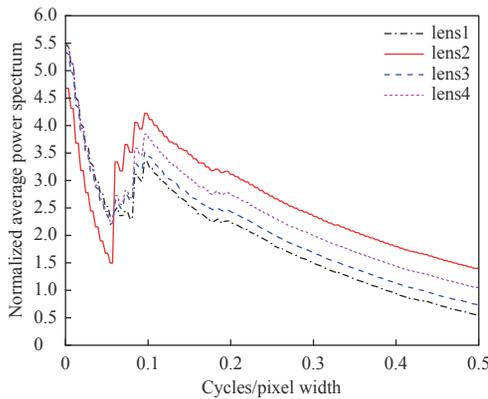


图10 平均功率谱曲线对比

Fig. 10 Comparison of average power spectrum curves

APSV、GMG及LS 参数值越大,图像分辨率越高,RGB 图像的细节轮廓越清晰,计算结果如表3所示。

表3 镜头 RGB 点阵图像清晰度评价参数

Table 3 Definition evaluation parameters of board lens RGB bitmap images

参数	指标			
	Lens1	Lens2	Lens3	Lens4
APSV	2.043 8	2.720 2	2.204 4	2.448 3
GMG	7.885 2	17.024 4	11.556 9	14.277 8
LS	31.884 2	94.921 2	64.453 8	77.009 8

由图10可见,随着频率的增大,RGB 点阵图像的平均功率谱幅值逐渐衰减。周期每像素宽度在0~0.1 范围内,平均功率谱的低频分量幅值迅速衰减,然后急剧增大,Lens2 镜头所对应的功率谱低频分量幅值波动最大,表明该镜头的RGB 灰度图像反差较大,像面对比度较高。在0.1~0.5 范围内,随着频率的增大,Lens2 镜头的RGB 点阵图像高频分量幅值衰减程度较小,表明该镜头获取的图像分辨率较高,图像细节轮廓较为清晰。

由表3 可看出,反映 Lens2 镜头显微成像清晰

度的 APSV、GMG 及 LS 参数值最大。由图 9(b) 可见,RGB 图像边缘视场对比度与分辨率较高,细节轮廓清晰可辨、RGB 点阵色彩鲜明,表明 Lens2 的光学像差较小,更适用于短光路、低倍率显微成像。Lens3 和 Lens4 镜头的成像清晰度评价参数值均小于 Lens2,由图 9(c)和图 9(d)可见,中心视场与边缘视场的点阵图像清晰度较好,但 RGB 三基色图像颜色产生失真,表明这两款镜头存在较大光学色差,无法准确解析目标磨粒的表面颜色特征。相比之下,Lens1 镜头的评价参数值最小,图 9(a) RGB 点阵图像边缘视场的像面模糊、分辨率低,表明 Lens1 存在较大场曲像差,图像细节轮廓难以识别、清晰度差。综上所述,Lens2 镜头获取的 RGB 点阵图像清晰度最好,表明其显微成像性能最佳,与本文提出方法的评价结果一致,适用于单板机镜头显微成像质量的定量评价。

4 结论

本文提出采用弧矢方向 MTFA 的平均值、子午方向 MTFA 的平均值和 MTFA 相对变化率作为像面参数,对单板机镜头显微成像性能进行定量评价。运用针孔法获得单板机镜头显微成像不同视场位置的光斑图像,以此为基础,通过傅里叶变换提取单板机镜头显微成像系统的 MTF。建立了单板机镜头透镜组 MTF 模型,基于边缘视场弧矢方向与子午方向的 MTF 曲线提取镜头显微成像质量评价的像面参数。对焦距、光圈数及出瞳直径相同的 4 款单板机镜头进行显微成像性能定量评价实验,确定了最佳显微成像镜头。分别采用 4 款被测镜头获取 RGB 点阵图像,从中提取平均功率谱值、灰度平均梯度以及拉普拉斯算子和评价 RGB 点阵图像清晰度,间接反映被测镜头成像性能,其结果与本文提出方法的评价结果相符,验证了像面参数评价方法用于单板机镜头显微成像性能定量评价的正确性和有效性,对于指导低倍率 OLVF 显微成像系统设计具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] FU Guangkai, CAO Yiping, LU Mingteng. A fast auto-focusing method of microscopic imaging based on an improved MCS algorithm[J]. Journal of Innovative Optical Health Sciences, 2014, 8(5): 1-10.
 [2] WOOD M C, BUSBY D K, FARNSWORTH P B, et al.

- Microscopic imaging of glass surfaces under the effects of desorption electrospray ionization[J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81: 6407-6415.
- [3] BOUSTANY N N, BOPPART S A, BACKMAN V. Microscopic imaging and spectroscopy with scattered light[J]. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 2010, 12: 285-314.
- [4] BULLEN A. Microscopic imaging techniques for drug discovery[J]. *Nature Reviews Drug Discovery*, 2008, 7(1): 54-67.
- [5] KIM W T, BAI C, CHO Y I. A study of CaCO₃ fouling with a microscopic imaging technique[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2002, 45(3): 597-607.
- [6] KASSIM A A, MANNAN M A, ZHU M. Texture analysis methods for tool condition monitoring[J]. *Image & Vision Computing*, 2007, 25(7): 1080-1090.
- [7] PEDERSEN L, DEANS M, KUNZ C, et al. Inspection with Robotic microscopic imaging[R/OL]. US: AIAA, 2005(2005-09-01). <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2005-6719/>.
- [8] 徐成强, 王营博, 曹杰, 等. 基于线阵CCD像素数提取的高速运动目标形变测量方法研究[J]. *应用光学*, 2019, 40(6): 1097-1102.
- XU Chengqiang, WANG Yingbo, CAO Jie, et al. Research on deformation measurement method of high-speed moving target based on linear CCD pixel number extraction[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(6): 1097-1102.
- [9] 李博, 冯松, 毛军红. 在线图像可视铁谱LED阵列反射光源设计与实现研究[J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(10): 29-34.
- LI Bo, FENG Song, MAO Junhong. Design and implementation of a LED array reflecting light for on-line visual ferrograph[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(10): 29-34.
- [10] FENG Song, FAN Bin, MAO Junhong, et al. Prediction on wear of a spur gearbox by on-line wear debris concentration monitoring[J]. *Wear*, 2015(336/337): 1-8.
- [11] MATSUZAWA T. Image field distribution model of wavefront aberration and models of distortion and field curvature.[J]. *Josa A*, 2011, 28(2): 96-110.
- [12] BLANDFORD B. Taking care of field curvature in visual optical instruments[J]. *SPIE*, 2008, 7100: 7100R-1-9.
- [13] 余承昊, 吕丽军. 应用波像差理论计算Kirkpatrick-Baez系统的调制传递函数[J]. *应用光学*, 2020, 41(5): 904-910.
- YU Chenghao, LYU Lijun. Calculating MTF of Kirkpatrick-Baez system by wave aberration theory[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(5): 904-910.
- [14] LI Tiecheng, FENG Huajun, XU Zhihai. A new analytical edge spread function fitting model for modulation transfer function measurement[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(3): 37-40.
- [15] CHAO C P, KAO Y H, HSU W H, et al. An on-line optical bench tester machine for evaluating lens quality[J]. *Microsystem Technologies*, 2014, 20(8/9): 1387-1395.
- [16] LENGWENUS A, ERICHSEN P. MTF measurement of infrared optical systems[J]. *SPIE*, 2009, 7481: 74810V-1-9.
- [17] SAMEI E, FLYNN M J An experimental comparison of detector performance for computed radiography systems[J]. *Med. Phys.*, 2002, 29: 447-459.
- [18] SHENG L, HONG H. Extended depth-of-field microscopic imaging with a variable focus microscope objective[J]. *Optics Express*, 2011, 19(1): 353-362.
- [19] MELZER A V, HECKMANN H G, RITTER C, et al. Fast and precise point spread function measurements of IR optics at extreme temperatures based on reversed imaging conditions[J]. *SPIE*, 2010, 7662: 766213-1-18.
- [20] BOREMAN G D. Modulation transfer function in optical and electro-optical systems[M]. US: SPIE Press, 2001.
- [21] BERTHOZ J, GRILLE R, RUBALDO L, et al. Modeling and characterization of MTF and spectral response at small pitch on mercury cadmium telluride[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015,44: 3157-3162.
- [22] 李铁成. 基于倾斜刃边法的遥感图像调制传递函数计算及图像复原技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- LI Tiecheng. Modulation transfer function calculation and image restoration based on slanted-edge method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [23] MOHAPATRA S M, TURLEY J D, PRINCE J R, et al. Transfer function measurement and analysis for magnetic resonance imager[J]. *Med. Phys.*, 1992, 19(2): 513.
- [24] NILL N B, BOUZAS B. Objective image quality measure derived from digital image power spectra[J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(4): 813-825.