

工业用光学镜头调制传递函数快速检测系统

陈珊珊 徐敏

(复旦大学光科学与工程系, 上海 200433)

摘要 调制传递函数(MTF)是评价光学系统成像质量的重要指标。根据光学传递函数测量的理论基础,以狭缝、刀口作为目标物,搭建了一套适用于工业用光学镜头的调制传递函数(MTF)测量、成本低、结构简单、精度高、稳定性好的测量光路,并根据光路特点编译了相关测量软件。测量软件根据自动聚焦的基本原理进行了自动调焦的开发,在兼顾效率和精度的前提下,分别采用爬山法和传统方法作为粗调焦和细调焦的调焦搜索算法,并根据不同物镜的成像特点采取不同聚焦函数进行聚焦判定。通过实验显示,该 MTF 快速检测系统具有良好的稳定性。

关键词 测量;调制传递函数;自动聚焦;聚焦评价函数;搜索算法

中图分类号 TP274⁺.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.051102

Modulation Transfer Function Fast Testing System for Industrial Lens

Chen Shanshan Xu Min

(Department of Optics Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract Modulation transfer function (MTF) is an important imaging quality indicator of optical system. On the basis of MTF testing theories, knife edge and slit as testing targets, a testing system which has low cost, simple structure, but high precision and high stability is developed to evaluating MTF of industrial lens. Besides, a correlative testing software is built according to the above. This testing software basing on the principles of the automatic focusing, and giving consideration to efficiency and precision, includes an automatic focusing system which rough focusing uses the method of mountain climbing as search algorithm, and which elaborate focusing uses the traditional method as search algorithm. In addition, different focusing evaluation functions are used in sharpness evaluation according to the trait of objective. Experimental data indicates this MTF fast testing system has high stability.

Key words measurement; modulation transfer function; auto-focusing; sharpness function; search algorithm

OCIS codes 110.3000; 110.4100; 110.4850

1 引言

随着计算机技术的高速发展和光电检测器件性能的不提高,国内外对光学传递函数测量的研究不断深入,研制出许多用于测量调制传递函数(MTF)的检测仪器。但这些测量仪器大多属于多功能、高精度的实验室仪器,不但价格昂贵、系统结构复杂、测量时间长、测量调节繁琐,而且通常只能在物距无穷远的条件下测量光学系统的光学传递函数,不适合用于工业批量镜头的 MTF 检测。本文根据相关理论,研发了一种成本较低、结构简单、测量精度高、稳定性好的光学系统成像质量评定装置,用于工业光学镜头的 MTF 检测。

2 光学传递函数的理论基础

光学系统成像质量的评价,可以由它的输入 $f(x, y)$ 和输出 $g(x, y)$ 的关系表征^[1]:

收稿日期: 2012-01-05; **收到修改稿日期**: 2012-02-20; **网络出版日期**: 2012-04-01

基金项目: 上海市引进技术的吸收与创新项目(2010CH-007)资助课题。

作者简介: 陈珊珊(1985—),女,硕士研究生,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: 082021011@fudan.edu.cn

导师简介: 徐敏(1959—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学设计、先进光学制造与现代光电检测等方面的研究。

E-mail: minx@fudan.edu.cn

$$g(x, y) = h(x, y) \times f(x, y), \quad (1)$$

即式中的 $h(x, y)$ 。因此通过对(1)式进行傅里叶变换:

$$G(f_x, f_y) = H(f_x, f_y) \cdot F(f_x, f_y), \quad (2)$$

可以得到 $h(x, y)$ 在频域上的分布 $H(f_x, f_y)$, 从而得到光学系统的光学传递函数。

3 自动调焦理论

光学系统 MTF 的测量过程中, 图像采集系统所采集的图像是否在待测光学系统的成像面上, 直接关系到所测的 MTF 是否能真实反映待测光学系统的成像质量。因此, 在图像采集前进行调焦工作对 MTF 的测量具有重要作用。物体的调焦过程实质是一个调焦搜索算法根据聚焦判断函数进行判决的过程。因此, 需要寻找一个合适的判决函数进行评价^[2]。国内外研究者经过多年研究提出的聚焦评价函数主要可以归结为^[3,4]:

1) 灰度梯度函数: 聚焦图像比离焦图像具有更多的灰度变化, 利用对图像灰度的各种处理方法来表征图像清晰度;

2) 频域函数: 通常正焦清晰图像比离焦模糊图像具有更多的高频信息。通过对图像像素值进行傅里叶变换, 对比高频处的图像信息就能评价图像清晰与否;

3) 信息学函数: 聚焦图像的信息熵大于离焦图像的信息熵, 因此图像的灰度熵可以作为图像清晰度的评价函数;

4) 统计学函数: 完全离焦的图像由单一灰度值组成, 而正焦的图像具有多灰度值分布, 因此可以利用图像灰度值直方图表征图像清晰度。

尽管频域函数能从整体上评价图像的清晰度, 但其计算量往往很大, 因此运用得很少^[5]。另外, 由于信息学函数和统计学函数对环境稳定性要求较高, 易受环境波动的影响, 而得出不理想的评价曲线, 导致误判焦点^[6]。灰度梯度函数采用图像相邻像素间的灰度差来计算, 微分运算对背景噪声、环境波动能有效抑制, 因此灰度梯度函数运用得较为广泛、适应性最强^[3]。另外, 聚焦评价函数不仅要考虑评价效果还要兼顾资源占用情况, 灰度梯度函数较前几种方法计算量较小, 因此在本检测系统软件中只考虑灰度梯度函数的方法^[7]。

在 MTF 检测系统中, 如何使系统成像面在最短时间内高精度地找到调焦范围内的正焦面, 即速度与精度, 是自动调焦搜索算法方案设计的首要目的^[4]。然而, 在自动调焦搜索算法中, 大的调焦范围与高效率是两个互相制约的因素, 往往难于同时得到满足, 因此需要寻找一个适合所用系统的自动调焦搜索算法, 以满足 MTF 快速检测系统对自聚焦系统的要求^[4,8]。目前常用的自动调焦搜索算法主要有: 传统方法、爬山法、求导法、对分法^[9]。经过相关研究, 本检测系统采用爬山法与传统方法相结合的方式作为自动调焦搜索算法。

4 MTF 快速检测系统及测试结果分析

根据光学传递函数的相关理论, 工业用光学镜头 MTF 快速检测系统的硬件组成主要分为五大部分: 目标光源、待测光学系统、图像采集系统、步进电机控制系统以及计算机, 如图 1 所示。对应的光路图如图 2 所示。

该测量系统采用物距有限距测量。其中, 光源提供均匀光照明; 目标物可选择狭缝或刀口; 图像采集系统为了配合各种工业镜头的检测, 配备了不同倍率的中继物镜。另外, MTF 检测系统中, 图像采集是利用 CCD 摄像机进行, 因此 CCD 摄像机是图像采集模块中的核心部分。本检测系统采用的是由大恒公司生产的 DH-SV400FM 黑白数字摄像机, 该摄像机的像素值为 45×10^4 pixel, 画幅大小为 $780 \text{ pixel} \times 582 \text{ pixel}$ 。传统彩色摄像机和黑白摄像机一般只能提供像素深度 8 bit 的输出,

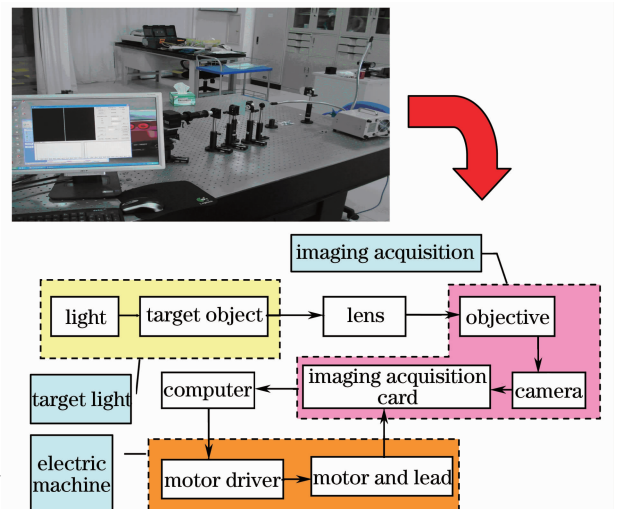


图 1 MTF 快速检测系统硬件组成部分

Fig. 1 Hardware of MTF fast testing system

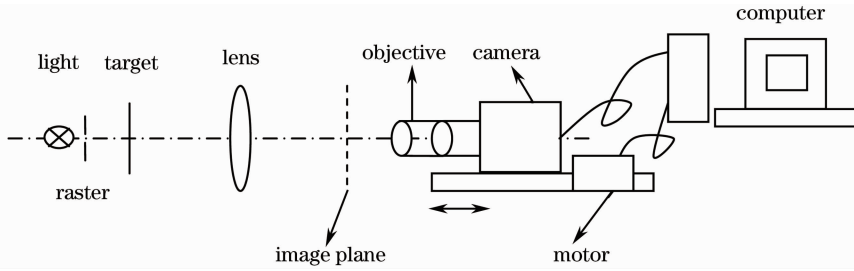


图 2 MTF 快速检测系统光路图

Fig. 2 Light path of MTF fast testing system

而该摄像机能够提供像素深度 12 bit 的输出,即图像灰度变化范围由 0~255 增加为 0~4095,如图 3 所示。12 bit 像素深度能提供更为准确的图像灰度值,避免了由于像素深度不足而引起的图像灰度值的误读。因此能为之后的图像处理以及调制传递函数的检测提供更精确的图像信息,使检测结果更准确。

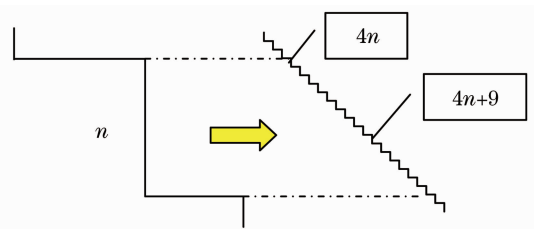


图 3 8 bit 像素深度与 12 bit 像素深度对比

Fig. 3 Comparison of pixel depth between 8 bit and 12 bit

根据检测系统的硬件组成,编译了相关的操作软件。本检测系统的软件平台编译是基于 VC++ 编程开发工具进行的。操作软件界面如图 4 所示。操作软件的主要功能有:图像显示、图像数据采集、MTF 的计算、调焦控制、数据保存、系统设置等。

调焦控制中的自动调焦搜索算法主要包括两个调焦过程:粗调焦过程与细调焦过程。粗调焦过程主要用于快速定位正焦面的大致范围。粗调焦过程步长较长,且受噪声影响较小,因此采用调焦速度较快的爬山法作为粗调焦过程的调焦算法。细调焦过程主要是用于精确定位正焦面,受噪声影响较大,因此采用传统方法作为细调焦搜索算法。另外,只有图像采集平面在正焦面的物镜焦深范围内才能采集到清晰图像。由于所使用的步进电机的精度为 1 μm,因此该检测系统自聚焦的聚焦精度可达到 1 μm。但由于受到中继物镜焦深的作用以及 CCD 像素尺寸的影响,使聚焦分辨率根据所使用的中继物镜的不同而不同。例如,在使用 1× 中继物镜时,聚焦分辨率为 100 μm,而使用 4× 中继物镜时,聚焦分辨率为 60 μm。聚焦分辨率进而又决定了粗、细调焦步长的设定。

自动调焦搜索算法确定后,需要根据调焦过程以及所使用的中继物镜选取聚焦评价函数,在此过程中还需要考虑噪声对聚焦评价函数判决效果的影响,并利用各种去噪方法尽量消除影响。以下列举了该 MTF 检测系统软件使用 1× 中继物镜或 4× 中继物镜时,如何选取聚焦评价函数。

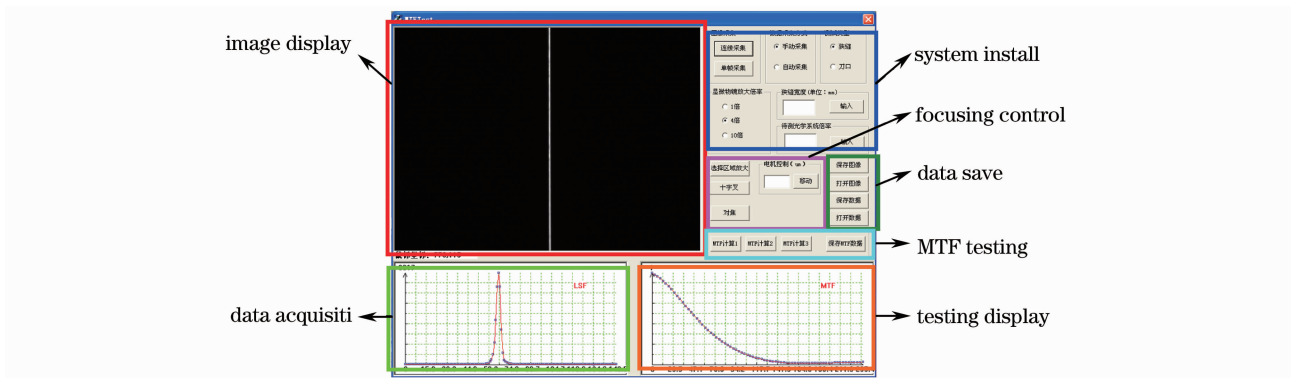


图 4 MTF 快速检测系统软件界面

Fig. 4 Software interface of MTF fast testing system

采用 1× 中继物镜时在粗调焦过程中,各灰度梯度函数对正焦面的响应如图 5 所示。绝对方差函数、Robert 梯度和函数、梯度向量模方函数、Laplacian 函数与 Tenengrad 函数在调焦范围内抗干扰能力较强,且能

正确反映正焦面的位置。但绝对方差函数、Robert 梯度和函数、梯度向量模方函数的灵敏度不高,对正焦面的反映不够强烈,影响聚焦评价函数的精确度;而 Tenengrad 函数由于在调焦范围能产生的双峰现象容易引起最佳成像位置的混淆,形成误差。相比之下,Laplacian 函数不仅单峰性好,而且灵敏度高,比较尖锐的峰值曲线可以使调焦搜索算法更加正确地定位正焦面的位置^[10]。另外,Laplacian 函数的计算量也较小,能满足测量系统高效率的要求。因此,Laplacian 函数是检测时采用 $1\times$ 中继物镜在进行粗调焦的最佳聚焦评价函数。

采用 $4\times$ 中继物镜时在粗调焦过程中,各灰度梯度函数对正焦面的响应如图 6 所示。灰度变化率和函数、绝对方差函数、Robert 梯度和函数、梯度向量模方函数、Variance 函数的灵敏度均不高,对正焦面的反映不够强烈。尤其是灰度变化率和函数的半峰全宽较大,将直接影响聚焦评价函数的精确度。Laplacian 函数与 Tenengrad 函数的调焦曲线较为尖锐,且半峰全宽较小。但 Tenengrad 函数的运算量较 Laplacian 函数而言相对复杂,运算开销太大,不能很好地满足检测系统高效率的要求。因此,Laplacian 函数是检测时采用 $4\times$ 中继物镜在进行粗调焦的最佳聚焦评价函数。

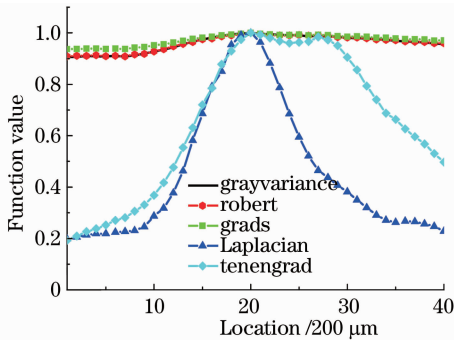


图 5 采用 $1\times$ 中继物镜的粗调焦曲线

Fig. 5 Rough focusing curve of $1\times$ objective

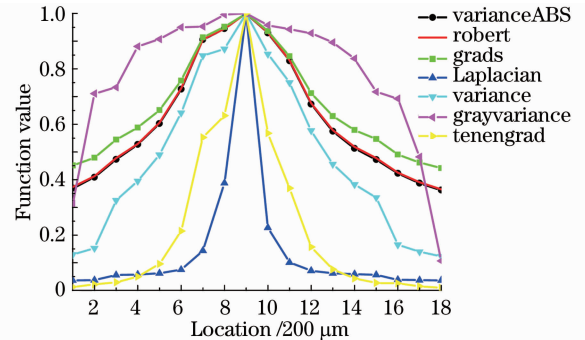


图 6 采用 $4\times$ 中继物镜的粗调焦曲线

Fig. 6 Rough focusing curve of $4\times$ objective

采用 $1\times$ 中继物镜时在细调焦过程中,各灰度梯度函数对正焦面的响应如图 7 所示。绝对方差函数、Roberts 梯度和函数、梯度向量模方函数在细调焦时,对正焦面的的评价反映并不是很明显;而 Laplacian 函数不仅在聚焦评价时不明显,而且受噪声和扰动影响时,其反映也相当激烈;理想正焦面应位于第 12 个步长处,但由于受到物镜焦深的影响,聚焦评价函数最大值的位置若处在第 7~17 个步长之间,即认为该处为理想成像面。Tenengrad 函数、Variance 函数、灰度变化率和函数最大值的位置均处于该范围内,且这三个评价函数对正焦面的评价反映也较为明显,但 Variance 函数与灰度变化率和函数受到噪声和扰动的影响反映较大,因此不适合用于细调焦。对于采用 $1\times$ 中继物镜进行细调焦,Tenengrad 函数是一个较为理想的聚焦评价函数。

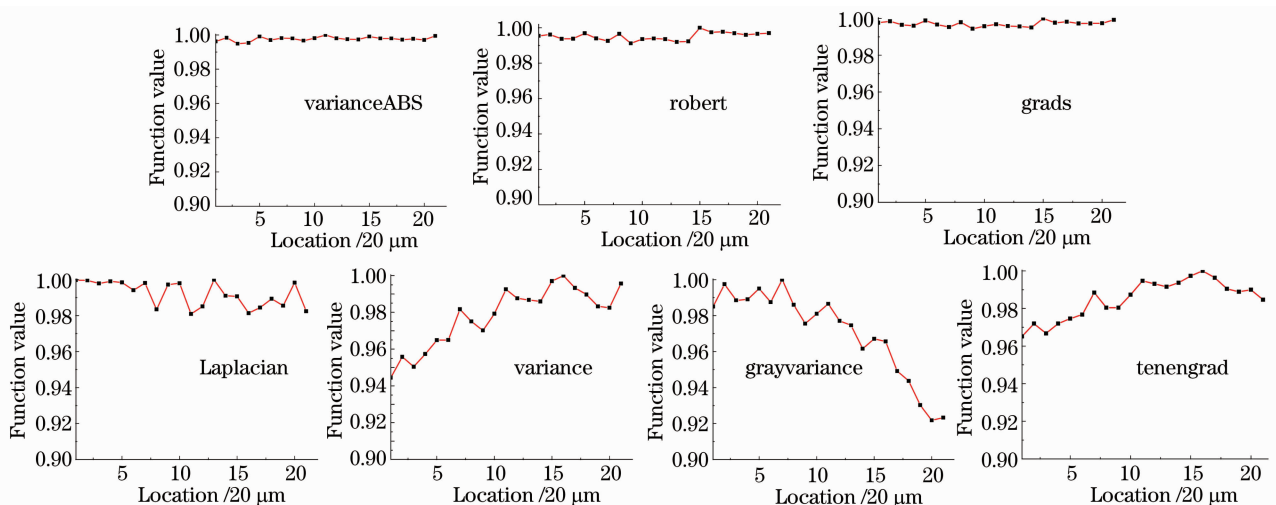


图 7 采用 $1\times$ 中继物镜的细调焦曲线

Fig. 7 Elaborate focusing curve of $1\times$ objective

采用 $4\times$ 中继物镜时在细调焦过程中,各灰度梯度函数对正焦面的响应如图 8 所示。理想正焦面应位于第 12 个步长处,但由于受到物镜焦深的影响,聚焦评价函数最大值的位置若处在第 9~15 个步长之间,即认为该处为理想成像面。由图可以看出,Variance 函数在调焦范围内的变化较为平缓,因此不能正确反映正焦面的位置;Laplacian 函数与 Tenengrad 函数在调焦范围内出现了双峰现象,且两峰的最大值均相当,容易引起最佳成像位置的误判;绝对方差函数、Robert 梯度和函数、梯度向量模方函数尽管在调焦范围内第 6 步长处存在最大值,但该位置已超出物镜焦深范围,因此可以判断最大值是由于噪声或环境扰动引起,即受扰能力不强;而灰度变化率函数对正焦面的反映较明显,其最大峰值处为第 11 步长,处在正焦面的焦深范围内,尽管在调焦范围内出现多个峰值的现象,但由于局部峰值与主峰值相差较大,并不影响调焦搜索算法的判定,因此灰度变化率函数可以作为采用 $4\times$ 中继物镜进行细调焦的聚焦评价函数。

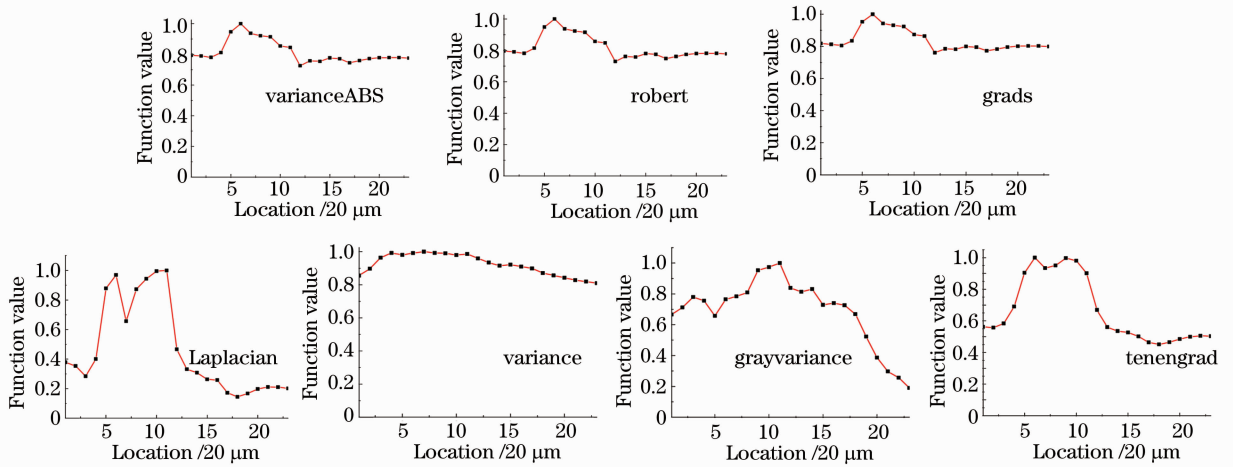


图 8 采用 $4\times$ 中继物镜的细调焦曲线

Fig. 8 Elaborate focusing curve of $4\times$ objective

MTF 快速检测系统经自动调焦前后图像对比如图 9 所示。经过自动调焦后,刀口以及狭缝的边缘较为清晰。对比调焦前后标准件的线扩散函数(LSF),如图 10 所示,调焦前的线扩散函数不仅中心最大值较小,且线扩散函数的半峰全宽也较大;调焦后的线扩散函数不仅中心最大值得到明显增加,而且半峰全宽也明显减小,说明调焦后的线扩散函数更锐利。

另外,实验表明该 MTF 快速检测系统还具有较好的稳定性。图 11 为对标准件进行 5 次 MTF 测量的结果,每次测量相隔 5 min,图中 a、b、c、d、e 分别对应一次测量结果。由图可以看出,5 次测量结果都较为接近。

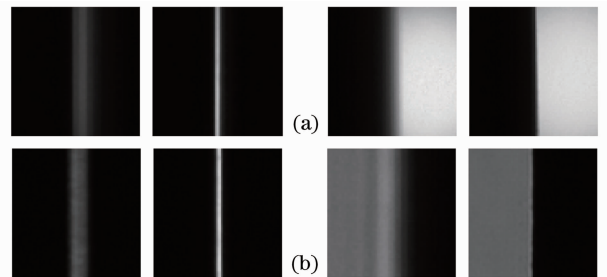


图 9 自动调焦前后图像对比。(a)采用 $1\times$ 中继物镜;
(b)采用 $4\times$ 中继物镜

Fig. 9 Imaging contrast between before and after auto-ocusing. (a) $1\times$ objective; (b) $4\times$ objective

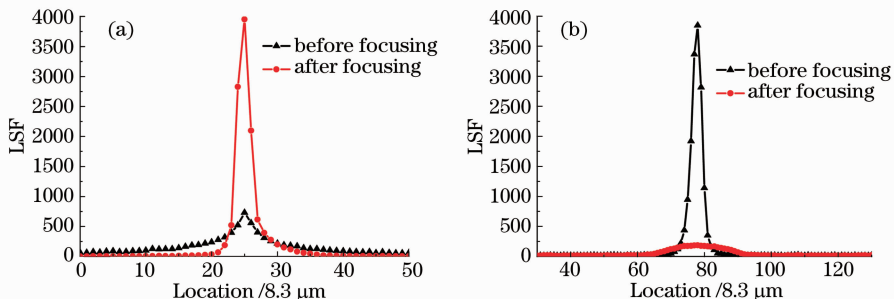


图 10 调焦前后线扩散函数对比。(a) $1\times$ 中继物镜;(b) $4\times$ 中继物镜

Fig. 10 Line spread function contrast between before and after auto-focusing. (a) $1\times$ objective; (b) $4\times$ objective

抽取 10 个空间频率的 MTF 值进行比较,最大标准方差为 0.0058,最小标准方差为 0.000031,平均值为 0.0027。数据显示本检测系统进行 MTF 测量时,受环境扰动以及噪声影响较小,具有良好的稳定性,稳定性可控制在 1% 以内。

5 结 论

根据不同目标物以及中继物镜,在兼顾效率和精度的前提下,通过研究聚焦评价函数以及调焦搜索算法,建成了一套结构简单、测量精度高的工业镜头 MTF 快速检测系统。经过实验表明,该 MTF 检测系统不仅能够满足多种测量需求,而且具有良好的稳定性。

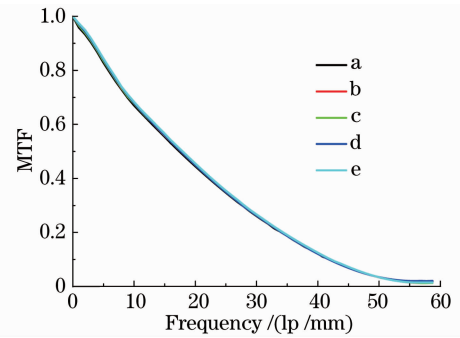


图 11 系统稳定性分析

Fig. 11 Stability analysis of the testing system

参 考 文 献

- Mai Weilin. Optical Transfer Function and Its Mathematical Methods[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979. 35~48
麦伟麟. 光学传递函数及其数理基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979. 35~48
- Xu Jie, Zhang Zhijiang, Lu Linhai *et al.*. Image processing for the automatic positioning system of pellet target[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2001, **9**(6): 568~571
徐 杰,张之江, 陆林海 等. 靶丸定位系统中的图像处理[J]. 光学精密工程, 2001, **9**(6): 568~571
- Sun Wen. The Auto-Focusing Technology Research of MTF Testing Device[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. 8~15
孙 文. 调制传递函数测试仪的自动调焦技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009. 8~15
- Gao Zhan. The Precision and Stability Research of Automatic Focusing Evaluation Function [D]. Jinan: Shandong University, 2007. 8~12
高 赞. 自动聚焦评价函数的精确度和稳定性研究[D]. 济南: 山东大学, 2007. 8~12
- Qiu Shenggen, Zhou Jie, Liu Xu *et al.*. Research of sharpness evaluation function in array pixel device projection display auto-focusing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 460~464
邱胜根, 周 杰, 刘 旭 等. 阵列像素器件投影显示系统中自动对焦评价函数研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(4): 460~464
- Zhao Hui, Bao Getang, Tao Wei *et al.*. Experimental research and analysis of automatic focusing function for imaging measurement[J]. *Optics and precision engineering*, 2004, **12**(5): 531~536
赵 辉, 鲍歌堂, 陶 卫 等. 图像测量中自动调焦函数的实验研究与分析[J]. 光学精密工程, 2004, **12**(5): 531~536
- Zhang Xudong, Wang Jingfeng, Cheng Yongqiang *et al.*. Design of multifunctional and integrative analog camera system [J]. *Chinese Journal and Liquid Crystals and Displays*, 2009, **24**(1): 116~120
张旭东, 王景峰, 程永强 等. 多功能一体化模拟摄像机系统设计[J]. 晶体与显示, 2009, **24**(1): 116~120
- Hu Tao, Chen Shizhe, Liu Guodong *et al.*. Algorithm of rapid auto-focusing with a long-range[J]. *J. Optoelectronics and Laser*, 2006, **17**(4): 464~467
胡 涛, 陈世哲, 刘国栋 等. 大范围自动调焦快速搜索算法[J]. 光电子激光, 2006, **17**(4): 464~467
- Zhang Hui. Research on Auto-Focusing of CCD Imaging Testing System[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2007. 13~15
张 辉. CCD 图像检测系统自动调焦的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007. 13~15
- Zhang Le, Jiang Wei. Application of multi-resolution analysis in anti-noise capability of auto-focusing algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2150~2154
张 乐, 姜 威. 多分辨力分析在自动聚焦算法抗噪声性能中的应用[J]. 光学学报, 2007, **27**(12): 2150~2154