

点源离焦图像位相复原方法

陈士泉^{1,2}, 马冬梅¹

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2.中国科学院研究生院,北京 100049)

摘要: 为了实现利用点源传递函数测试仪器在测量可见光镜头光学传递函数的同时测出镜头出瞳的波前,采用了一种基于点源目标离焦图像的位相复原算法。该方法无需改变点源传递函数测试仪器的硬件设置,直接利用在传递函数测试过程中,通过改变位于镜头后焦面附近的显微镜与 CCD 的位置所采集的多幅离焦图像及改进的 GS 算法实现离焦面与镜头出瞳面光场的位相复原。对多幅离焦图像进行计算求取位相值,最后展开出瞳面的位相得到波前。为了验证波前计算结果的正确性,用干涉仪测出样品镜头的波前,将两个测试结果相比较,结果表明:点源位相复原波前与干涉测量波前接近,该算法可行。

关键词: 傅里叶光学; 位相复原; 离焦图像; 改进 GS 算法

中图分类号: TH703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2011)10-2054-04

Phase retrieval method with point source defocus image

Chen Tuquan^{1,2}, Ma Dongmei¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physic, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to measure the wavefront of exit pupil while measuring the modulation transfer function (MTF) of the lens with point source optical transfer function test instrument, a phase retrieval algorithm based on the defocus images of point source target was used. This algorithm could implement without changing the test equipment of MTF, during the MTF measuring process, several defocus images were collected by longitudinal shift of the microscope and CCD near the focal plane. Based on the defocus images and modified GS algorithm, the phase retrieval of defocus plane and the exit pupil plane were realized. The value of the several phases of the defocus image was calculated, and the phase of exit pupil was unwrapped to get the wavefront of pupil plane. The availability of the algorithm was confirmed by comparing the retrieval wavefront with the wavefront measured through phase-shifting interferometer. The result verifies them close each other.

Key words: Fourier optics; phase retrieval; defocus images; modified GS algorithm

收稿日期:2011-02-05; 修订日期:2011-03-10

基金项目:应用光学国家重点实验室资助项目(09Q03FQ090)

作者简介:陈士泉(1984-),男,硕士生,主要从事光学成像检测方面的工作。Email:myctq@163.com

导师简介:马冬梅(1963-),女,研究员,博士生导师,主要从事光学检测和光电成像系统性能测评的研究。Email:dongmei_ma2002@yahoo.com

0 引言

传递函数和波像差是光学镜头的质量评价时普遍使用的两种评价方法。传递函数反映的是光学镜头对目标细节的分辨能力,是对镜头整体成像能力的评价。而波像差如彗差、像散、球差等则是造成光学镜头成像质量下降的直接因素,利用各种像差的数值可以定性和定量地分析镜头的失调量,用于指导其修复工作。但两个参数的测量要分别使用不同的检测仪器,传递函数用的是传递函数测试仪,而波像差的测量一般使用各种类型的干涉仪。除了干涉测试技术外,利用位相复原技术同样可以实现对光学镜头波像差的计算。位相复原技术是一种基于图像的波前传感技术^[1],其算法由 GS 算法发展到混合输入输出算法、改进的 GS 算法等^[2-4]。

位相复原技术在采集图像时,由于受到图像传感器像元尺寸的限制,焦面附近图像的采样率有时无法满足奈奎斯特采样定理,因此,需要在离焦面较远的位置采集离焦图像进行计算,但离焦量的增加同时也会造成图像的信噪比下降,失去图像的细节信息。利用点源传递函数测试仪输出的平场消色差显微镜放大 20 倍的点目标图像,该图像在不降低信噪比的情况下同时满足了奈奎斯特采样定理。并且不需要增加其他硬件,只用点源传递函数测试仪和位相复原算法即可实现光学镜头波像差的测试。

1 理论分析

位相复原技术是一种基于图像的波前传感技术,它利用图像探测器输出的光场强度分布逆向推算出光场的位相信息。图 1 为离焦图像采集的原理。

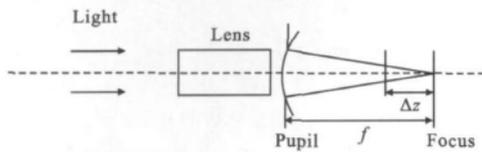


图 1 离焦图像采集原理
Fig.1 Principle of defocus image grabber

由平行光管发出的一束平行单色光进入光学镜头,在镜头的焦面上可以观察到出瞳处波面的汇聚光斑。在衍射受限(无像差)的情况下该光斑为爱里斑,

如果受到像差的影响,衍射斑的形状将会改变,中心能量下降^[5]。设光瞳处的复数光场为 $U_{pupil}(i, j)$, 则:

$$U_{pupil}(i, j) = \sqrt{I_p(i, j)} \cdot \exp[i \cdot \phi(i, j)] \quad (1)$$

式中: $i^2 = -1$; $\sqrt{I_p(i, j)}$ 为光瞳的振幅函数,理想情况下通光孔径内为 1,通光孔径外为 0; $\phi(i, j)$ 是以位相形式表示的波前函数;光瞳的采样矩阵范围为 $M \times N$ 。由菲涅耳衍射原理可以得出离焦面的光场 $U_{defocus}(m, n)$ 。

$$U_{defocus}(m, n) = \exp\left\{ \frac{i\pi}{\lambda f} [(m \cdot \Delta m)^2 + (n \cdot \Delta n)^2] \right\} \cdot$$

$$FFT\{U_{pupil}(i, j) \cdot \exp[i \cdot \phi_{defocus}(i, j, \Delta z)]\} \quad (2)$$

式中: f 为光学镜头的焦距; λ 为入射波长; $\phi_{defocus}(i, j, \Delta z)$ 是离焦量为 Δz 的位相函数; FFT 表示离散的傅里叶变换; 焦面处水平和垂直方向的采样间隔 Δm 和 Δn 与光瞳面的采样间隔 Δi 和 Δj 之间的关系为:

$$\Delta m = \frac{\lambda f}{M \Delta i}, \Delta n = \frac{\lambda f}{N \Delta j} \quad (3)$$

离焦像差函数表达式为:

$$\phi_{defocus}(i, j, \Delta z) \approx \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta z}{8F^2} (x_i^2 + y_j^2) \quad (4)$$

式中: x_i, y_j 为光瞳处的坐标; F 为光学镜头相对孔径值的倒数。离焦量 Δz 可以用传递函数测试仪准确地测量出来, F 与 λ 均为已知量,因此由公式(1)、(2)和(4)可以求出用离焦函数表示的初始光场^[6-9]。文中所采用位相复原算法为基于图像的迭代复原算法,其基本的迭代运算过程如图 2 所示。

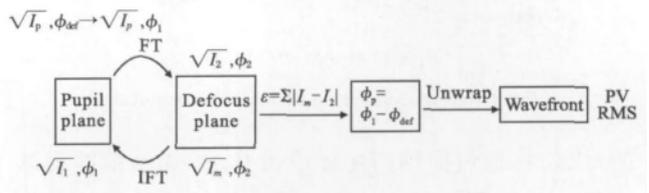


图 2 迭代流程图
Fig.2 Flowchart of iteration

光瞳处光场强度分布 $\sqrt{I_p}$ 无法用探测器进行探测,但在均匀平行光入射的情况下可以假设光瞳为圆域函数,即通光孔径内的光强为 1,孔径外为 0。开始迭代时以离焦的光瞳光场 ϕ_{def} 作为初始光场的位相,将光瞳光场衍射到离焦面得到离焦光场的振幅与位相分别为 $\sqrt{I_2}$ 和 ϕ_2 ,保留位相部分,振幅部分用探测器测得的光强值的开方 $\sqrt{I_m}$ 替代;接着再将替换后的离焦面光场逆向衍射回光瞳面,得到光瞳

处新的光场分布为 $\sqrt{I_1}$ 和 ϕ_1 , 同样保留位相部分, 将振幅部分更换为 $\sqrt{I_p}$; 然后再进入新一轮的迭代。为了评价迭代的精度 (即复原图像与实际图像的相似度) 和控制迭代的次数, 引入图像误差因子 $\varepsilon = \sum |\sqrt{I_m} - \sqrt{I_2}|^2 / \sum I_m$, ε 的值越小表示迭代的精度越高, 当 ε 小于一定的值或随着迭代次数的增加变化很小时, 迭代结束。将此时的光瞳光场位相 ϕ_1 减去离焦的位相 ϕ_{def} 得到最后光瞳的位相 ϕ_p , 最后对位相做展开处理, 求出波面并计算其 RMS 和 PV 值^[10]。

2 实验结果及分析

为了验证算法的有效性, 用点源传递函数测试仪对一个焦距为 685 mm, 相对孔径为 1:10, 光瞳直径约为 70 mm 的无中心遮拦的镜头。在光源处加了工作波长为 632.8 nm 的滤光片, 平行光管的焦距为 4 m, 平场消色差显微镜的放大率为 20 倍, CCD 的像元尺寸为 $9.28 \mu\text{m} \times 9.30 \mu\text{m}$ 。

如图 3 所示, 离轴抛物式平行光管发出一束平行光经过待测镜头后在其后焦面汇聚成点源像, 移动显微镜与 CCD 模块, 使其工作面与镜头后焦面重合。开启传递函数测试软件控制步进电机进行精确

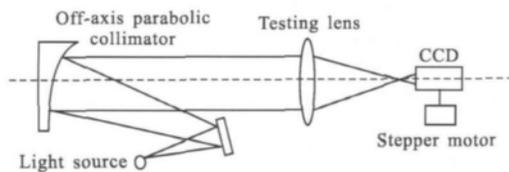


图 3 位相复原试验装置

Fig.3 Experimental setup of the phase retrieval

的对焦, 将该焦面轴向坐标设为 0。传递函数的测试利用的是焦面的图像, 而位相复原算法计算的图像为离焦图像, 因此, 需要改变步进电机的参数移动显微镜与 CCD 到离焦位置。实验中离焦量的取值范围选在 $240 \sim 480 \mu\text{m}$, 这是因为当离焦量小于 $240 \mu\text{m}$ 时, 点扩展函数能量过于集中, 图像中间的光强度远远大于周围的光强度值, 不利于位相复原计算; 而当离焦量大于 $480 \mu\text{m}$ 时, 离焦点扩展函数的强度分布随着离焦量的增加快速扩散, 图像强度值下降, 信噪比值降低, 位相复原误差增大。因此, 为了减少计算误差, 实验采集了焦后 $240 \mu\text{m}$ 、 $360 \mu\text{m}$ 和 $480 \mu\text{m}$ 不同位置处的图像。

图 4 为 CCD 输出的原始图像, 图像中包含了部分高频和背景噪声。点源法传递函数测试可以采用手动和自动两种背景噪声消除法, 文中采用了手动法。在每个离焦位置都将平行光管光源遮住, 采集 CCD 对背景光所成的图像, 然后把离焦图像与背景光图像相减消去部分背景噪声, 最后还对图像做高斯平滑处理抑制高频噪声的影响。因为采集的图像是经过显微镜放大 20 倍后的图像, 等价于减小了 CCD 像元的尺寸, 所以, 在迭代运算中需要在原始数据的末端增加一些零值来增大采样数的值并保持原始数据不变。根据离散傅里叶变换的性质, 将序列填充零值而人为加长后再进行傅里叶变换, 就可以得到更高分辨率的图像。

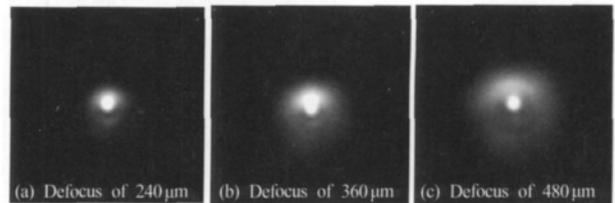


图 4 离焦星点图像

Fig.4 Point images with defocus

经过分别对焦后 3 个不同离焦量位置采集的离焦图像的迭代计算得到镜头出瞳处的位相分布值, 再对位相进行解包裹处理后得到的波前图如图 5 所示。

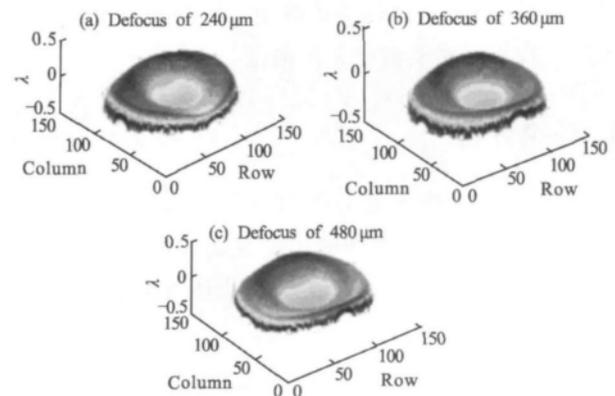


图 5 位相复原后的波前

Fig.5 Wavefront after phase retrieval

对比 3 个波前图可以看出: 焦后 $360 \mu\text{m}$ 和 $480 \mu\text{m}$ 的计算结果较为接近, 而焦后 $240 \mu\text{m}$ 计算的波前除了局部的偏差外, 其余大部分区域均与另外两个波前一致。该结果证明了位相复原算法的稳定性。表 1 中列出了 3 个波前的 RMS 及 PV 值, 工作波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。

表 1 位相复原波前参数

Tab.1 Parameters of phase retrieval wavefront

Defocus/ μm	240	360	480
RMS/λ	0.074 9	0.072 9	0.080 8
PV/λ	0.468 4	0.512 4	0.560 2

图 6 为利用移相式干涉仪以自准直法测得镜头的干涉图,经过解包裹处理后的波前图。将图 5 与图 6 相比较,位相复原计算结果与干涉测量结果波前误差分布基本一致。

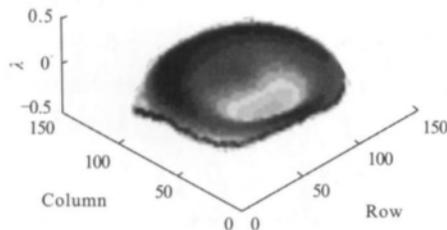


图 6 干涉测量波前

Fig.6 Wavefront by interferometer

利用移相干涉仪测量该镜头的波前参数为: $RMS=0.0950\lambda$, $PV=0.5931\lambda$ 。该值与离焦量 $480\mu\text{m}$ 图像的计算结果最为接近,偏差量分别为 $\Delta RMS=0.0142\lambda$, $\Delta PV=0.0329\lambda$ 。可见在不影响信噪比的情况下,适当增加离焦量采集图像可以提高计算的精度。为了控制迭代次数,并且实时评价位相复原迭代的精度,在迭代的过程中同步计算迭代的图像误差因子 ε ,其值的变化曲线如图 7 所示。在迭代开始的时候,收敛速度较快,误差因子快速下降,当迭代大于 50 次后,误差因子稳定在 0.008 左右,再增加迭代次数也无法提高迭代的精度。

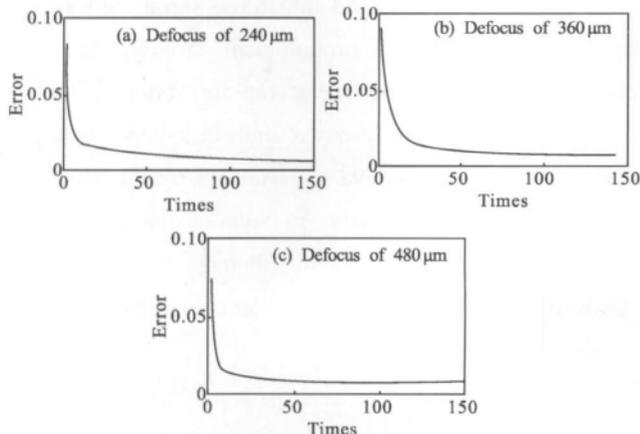


图 7 位相复原迭代误差

Fig.7 Error of phase retrieval iteration

3 结论

文中根据位相复原技术的原理,提出了一种利用点源传递函数测量仪采集镜头的离焦图像,迭代计算出镜头波前的方法。实验结果表明:该算法具有稳定的收敛特性,通过与干涉测量结果比较,证明了位相复原算法的正确性。另外,由于对图像放大了 20 倍,在提高图像分辨细节的同时也增大了图像的噪声,因此,计算结果与干涉测量结果还存在一定的偏差。下一步将研究通过改变放大倍率,完善迭代算法提高计算精度。

参考文献:

- [1] Han Changyuan. Progress in space optics and wavefront sensing technique[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2008, 1(1): 13-14. (in Chinese)
韩昌元. 空间光学的发展与波前传感技术[J]. *中国光学与应用光学*, 2008, 1(1): 13-24.
- [2] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. *Appl Opt*, 1982, 21: 2758-2769.
- [3] Bruce H D, David L A, Smith J S, et al. Phase retrieval algorithm for JWST flight and testbed telescope [C]//SPIE, 2006, 6265: 626511/1-17.
- [4] Zhang Kun, Hong Hanyu, Sun Xiechang, et al. Survey of image deconvolution from wave-front sensing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 131-134. (in Chinese)
张坤,洪汉玉,孙协昌,等. 基于波前测量的图像复原技术综述[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 131-134.
- [5] Goodman J W. Introduction to Fourier Optics [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [6] Arun A, Giancarlo P, Wolfgang O, et al. Phase retrieval using a random amplitude mask for wavefront sensing [C]//SPIE, 2007, 661766170J: 1-8.
- [7] Lawton H L, Gopal V, Eric H S. Point-by-point approach to phase-diverse phase retrieval [C]//SPIE, 2003, 4850: 441-452.
- [8] Brady G R, Fienup J R. Nonlinear optimization algorithm for retrieving the full complex pupil function[J]. *Optics Express*, 2006, 14(2): 474-486.
- [9] Mao Heng, Zhao Dazun. Alternative phase-divers phase retrieval algorithm based on Levenberg-Marquardt nonlinear optimization [J]. *Optics Express*, 2009, 17(6): 4540-4552.
- [10] Daniel Malacara. Optical Shop Testing [M]. 3rd ed. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1992.