

基于叠层扫描成像技术的成像透镜透射波前测量方法

纵榜铭, 栾嘉蕴, 蒋志龙, 孔艳, 王绥珂, 刘诚*

江南大学理学院, 江苏 无锡 214122

摘要 将叠层扫描成像技术(ePIE)用于成像透镜透射波前的高精度测量。将透镜的透射光束照射至一个固定于二维扫描台的衍射物上,并在其后的探测器上形成衍射光斑,扫描台横向扫描并记录衍射物在每个位置所形成的衍射光斑,采用 ePIE 精确重建衍射物体的光场复振幅,并据此反演出透镜后表面的透射光波前;移去透镜后重复上述步骤,可以重建入射到透镜上的光束波前;将透射波前减去入射波前即可得到透镜的透射波前。该方法具有准确性高、结构简单、成本低廉等优点。

关键词 测量; 透镜透射波前; 叠层扫描成像技术; 衍射成像; 波前重建

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0804001

Method to Measure Transmitting Wave-Front of Imaging Lens Based on Extended Ptychographical Iterative Engine

Zong Bangming, Luan Jiayun, Jiang Zhilong, Kong Yan, Wang Shouyu, Liu Cheng*

School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract An extended ptychographical iterative engine (ePIE)-based method is proposed to accurately measure the transmitting wave-front of an imaging lens. The laser beam exiting the imaging lens is illuminated on a diffraction object fixed on a two-dimensional scanning stage, and the diffraction pattern is formed on the subsequent detector. The scanning stage transversely scans and records the diffraction pattern formed by the diffraction object at each position. The complex amplitude of the laser field incident on the diffraction object is faithfully reconstructed from the recorded diffraction pattern using the proposed ePIE algorithm, and the wave-front of the transmitted laser on the rear surface of the lens is retrieved using the Fresnel equations. Additionally, the wave-front illuminated on the lens can be reconstructed by repeating the above mentioned procedures after the lens is removed. Then, the transmitting wave-front of the lens is obtained by subtracting the illuminated wave-front from the exiting wave-front. The proposed method has several advantages including high accuracy, simple structure, and low cost.

Key words measurement; transmitting wave-front of lens; extended ptychographical iterative engine; diffraction imaging; wave-front reconstruction

OCIS codes 050.1940; 100.5070; 120.5050

1 引言

光束穿过成像透镜前后所发生的波前变化由透镜的实际参数严格决定,测量光束所发生的波前变化可以得到透镜的具体成像性质,因此透镜的透射波前测量在传统透镜加工和质量检验等领域都有广泛的应用^[1-4]。同时,随着计算光学成像技术的发展,在精确获知透镜透射波前的基础上,可以基于质量不理想透镜所形成的低分辨率图像重建出高分辨图像,因此透镜波前的测量显得愈发重要。干涉测量、Shack-Hartmann 传感

收稿日期: 2018-12-20; 修回日期: 2019-01-17; 录用日期: 2019-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(U1730132,61705092)、江苏省自然科学基金(BK20170194,BK20180598)

*E-mail: cheng.liu@hotmail.co.uk

和数字全息干涉等^[5-9]所有相位成像技术都可以用来测量成像透镜的透射波前。干涉测量^[10-12] 通过从干涉条纹中提取样品光和参考光之间的相位差来实现相位重建,但参考光的使用不仅使光学系统变得复杂,而且非理想的参考光波前的误差被直接带入测量结果,环境的振动也会引入明显的误差。剪切干涉测量^[13-15]不需要参考光,而且对环境的不稳定性不敏感,但其直接获得相位梯度,导致后续的积分过程非常容易将原本分散存在的噪声弥散到整个测量孔径,从而产生明显误差。**Shack-Hartmann** 传感器是一种常用的非干涉相位测量工具,通过判断各个子孔径焦点的位置来计算波面的梯度,具有结构紧凑和使用方便的优点^[16-18],但是其分辨率由其子孔径个数决定,大多数情况下只能获得波前轮廓信息,因此很难满足高精度和高分辨率的要求,而且由于在测量大相位梯度波面时容易发生焦点阵列混叠,一般只用来测量近似平面波前。

为对成像透镜的透射波前进行高精度和高分辨测量,本文提出一种基于叠层扫描成像技术(**ePIE**)^[19-23]的透镜透射波前测量方法。透镜透射波前测量方法使用不需要参考光的紧凑共光路系统,同时具有传统干涉测量高分辨和高精度的特点以及 **Shack-Hartmann** 传感器结构紧凑、使用方便和对环境不敏感的优点。由于所记录的光斑数量可以超过百幅以上,且其具有高度的数据冗余度,并且在数据重建中包含的 **Weiner** 滤波过程使得重建光场几乎没有散斑噪声^[24-26],因此能够获得比传统干涉测量更高的信噪比。

2 测量原理

图 1(a)为基于 **ePIE** 的透镜透射波前测量方法的实验装置示意图,其中 **CCD** 为电荷耦合器件。扩束准直后的 **He-Ne** 激光照射到被测透镜上,在透镜前表面紧贴透镜放置一个和透镜口径相同的小孔。穿过透镜的光束照射至一固定于二维平移台上的衍射物体上,并在其后探测器靶面上形成衍射光斑,在衍射物体二维阵列扫描的过程中,探测器记录下每个扫描位置所形成的衍射光斑阵列。基于该衍射光斑阵列和光路几何参数,照射至扫描物体表面的光场分布可以用 **ePIE** 精确重建,然后利用菲涅耳衍射公式精确反演透镜后表面的光场分布。当照射到透镜上的光束是理想平行光时,反演得到的透镜后表面光场的波前分布就是透镜的透射波前,但由于实验误差的影响,照明光束不可能是绝对的平行光,所以需要测量入射到透镜前表面的光场分布,这里只要将透镜移去然后重复上述实验步骤,即可以测量得到入射至透镜前表面的波前,并用透射波前减去入射波前即可得到精确的透镜透射波前。因为透射波前和照明波前的差值与照明光的实际相位分布无关,所以这个方法不需要非常理想的波前平整的照明光。值得说明的是在实验过程中,在透镜安装后需要首先测量其透射光波前分布,然后将透镜移开,在其他所有的实验设备全部不变时,再对待测透镜的入射光波进行测量。由于全部过程都在隔震光学平台上完成,而且光路周围用有机玻璃罩隔断气流,在被测量元件的口径不是很大时(直径小于 20 cm),可以认为光束波前是稳定不变的。

收稿日期: 2018-12-20; 修回日期: 2019-01-17; 录用日期: 2019-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(U1730132,61705092)、江苏省自然科学基金(BK20170194,BK20180598)

*E-mail: cheng.liu@hotmail.co.uk

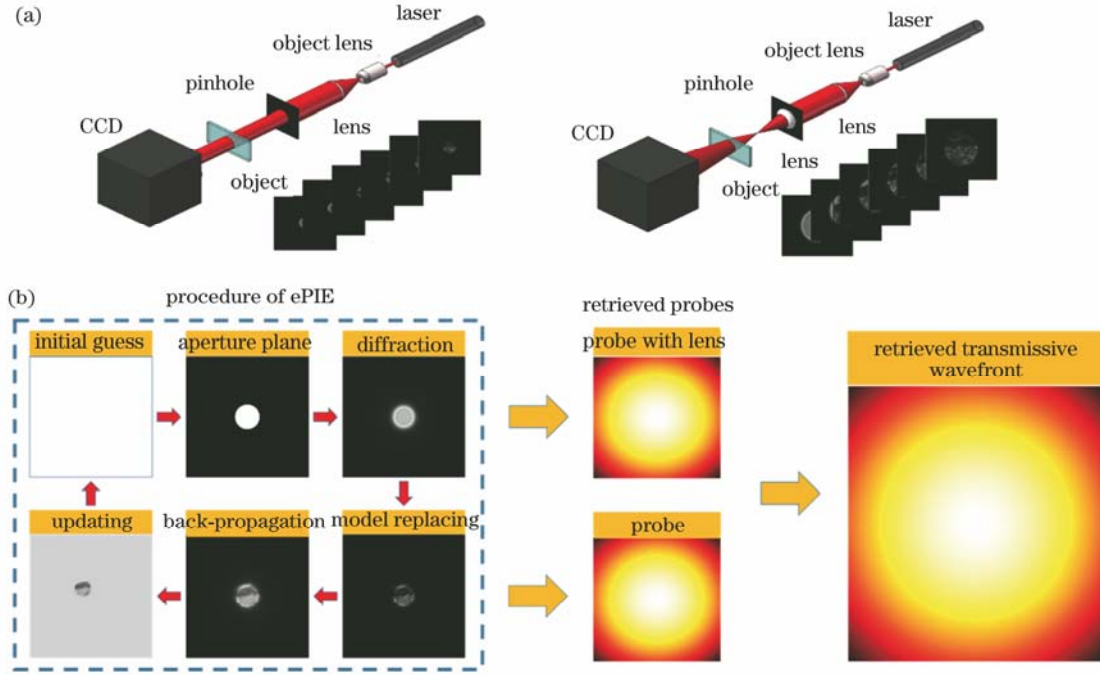


图 1 基于 ePIE 的透射波前测量方法。(a)实验装置示意图;(b)算法流程图

Fig. 1 ePIE-based transmitting wave-front measuring method. (a) Experimental setup; (b) flow chart of algorithm

上述的测量透镜波前的流程需要分两步来实现,测量和数据处理过程如图 1(b)所示,其数据迭代处理步骤如下:

步骤 1. 将照射至扫描物体表面的光场复振幅 $P_n(x, y)$ 与扫描物体透射函数 $O_{m,n}(x, y)$ 相乘计算出射光场复振幅 $w_{m,n}(x, y)$, m 表示物体的扫描位置, n 表示迭代次数。将 $w_{m,n}(x, y)$ 数值传播至探测器靶面,得到该位置处的复振幅分布 $W_{m,n}(u, v)$,

$$w_{m,n}(x, y) = O_{m,n}(x, y) \times P_n(x, y), (1)$$

$$W_{m,n}(u, v) = F_{d1}[w_{m,n}(x, y)] = |W_{m,n}(x, y)| \times \exp[i\varphi_{out}(x, y)], (2)$$

式中, F 表示正向菲涅耳传播, d_1 为扫描物体面和探测器靶面之间的距离,具体菲涅耳衍射公式为

$$U_0(x_1, y_1) = F \left[U(x, y) \times \exp \left(ik \frac{x^2 + y^2}{2d} \right) \right]. (3)$$

步骤 2. 将探测器靶面处 $W_{m,n}(u, v)$ 的振幅分布用采集到的衍射强度分布 $I_m(u, v)$ 的平方根代替,并保持其相位不变,得到 $W'_{m,n}(x, y)$,之后将 $W'_{m,n}(x, y)$ 数值逆向传播至衍射物体后,得出新的透射光场 $w'_{m,n}(x, y)$:

$$W'_{m,n}(u, v) = \sqrt{I_m(u, v)} \times \exp[i\varphi_{out}(u, v)], (4)$$

$$w'_{m,n}(x, y) = F_{d1}^{-1}[W'_{m,n}(u, v)]. (5)$$

步骤 3. 根据

$$O_{m,n+1}(x, y) = O_{m,n}(x, y) + \frac{|P_n(x, y)|}{|P_n(x, y)|_{max}} \frac{P_n^*(x, y)}{[|P_n(x, y)|^2 + \alpha]} \times [w'_{m,n}(x, y) - P_n(x, y) \cdot O_{m,n}(x, y)], (6)$$

收稿日期: 2018-12-20; 修回日期: 2019-01-17; 录用日期: 2019-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(U1730132,61705092)、江苏省自然科学基金(BK20170194,BK20180598)

*E-mail: cheng.liu@hotmail.co.uk

$$P_{n+1}(x, y) = P_n(x, y) + \frac{|O_{m,n}(x, y)| O_{m,n}^*(x, y)}{|O_{m,n}(x, y)|_{\max} [|O_{m,n}(x, y)|^2 + \beta]} \times [w'_{m,n}(x, y) - P_n(x, y) \cdot O_{m,n}(x, y)], (7)$$

分别更新物体的透射函数 $O_{m,n}(x, y)$ 和照明光的复振幅 $P_n(x, y)$, 式中, “*” 表示共轭, α 和 β 一般为介于 0.1 和 1 之间的常数, 其作用是避免分母为零的情况出现。另外, (7) 式右边第二项通过在透射光中将物体的透射函数移除而得到照明光, 因此透射波前和所用的扫描物体无关^[27], 因此使用任意物体进行实验最终都不会影响待测透镜透射波前的精确测量。

步骤 4. 将扫描物体移动至第 $(m+1)$ 个位置, 并重复步骤 1~4, 直至所有的位置全部计算完毕。

步骤 5. 将当前计算所得 $O_{n+1}(x, y)$ 与上一次计算所得 $O_n(x, y)$ 按照

$$E_{error} = \frac{\sum ||O_{n+1}(x, y)| - |O_n(x, y)||^2}{\sum |O_n(x, y)|} (8)$$

进行误差计算, 若误差大于 0.5%, 则重复步骤 1~4, 若小于 0.5%, 则执行步骤 6。

步骤 6. 将 $P_{n+1}(x, y)$ 用菲涅耳衍射公式逆向传播至透镜后表面, 得到透射光场复振幅分布 $P_T(x_1, y_1)$:

$$P_T(x_1, y_1) = F_{d_2}^{-1} [P_{n+1}(x, y)], (9)$$

式中, d_2 为扫描物体与小孔之间的距离。

步骤 7. 透镜移开后以同样的方式记录衍射斑分布, 重复上述迭代过程, 并将迭代得到的样品的光场复振幅分布传播到原来透镜的位置, 得到入射到透镜上的光场分布 $P_0(x, y)$ 。

步骤 8. 利用

$$L(x_1, y_1) = \text{angle}[P_T(x_1, y_1) P_0^*(x_1, y_1)] (10)$$

计算出待测透镜的透射函数 $L(x_1, y_1)$, 式中, $\text{angle}\{\}$ 为取角度运算。

3 数值模拟和实验测量

首先通过数值模拟对所提出的测量方法的可行性进行验证, 假定所用照明光波长为 632.8 nm, 探测器像素数为 2048 pixel×2048 pixel, 像素大小为 7.4 μm×7.4 μm, 透镜孔径为 4 mm, 扫描物体和探测器之间的距离 d_1 为 200 mm, 小孔和扫描物体之间的距离 d_2 为 200 mm (这些参数均根据实际实验设定)。另外, 为使模拟结果尽可能和实际实验相符合, 计算衍射斑强度分布时加入 30 dB 的高斯噪声。图 2(a) 为扫描物体的实际振幅和相位, 图 2(b) 为实际入射至透镜前表面的光场相位, 图 2(c) 为待测透镜实际透射波前分布。在待测透镜放入光路和移出光路两种情况下, 分别将衍射物体扫描 8×8 个位置并同时记录所形成的 64 幅衍射强度分布。图 2(d) 为透镜移开后采集到的衍射强度分布, 图 2(h) 为透镜存在时采集到的衍射强度分布。记录这些衍射斑时, 物体两相邻扫描位置的照明区域约有 70% 的重叠, 以保证较快的收敛速度和较好的重建质量。

收稿日期: 2018-12-20; 修回日期: 2019-01-17; 录用日期: 2019-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(U1730132, 61705092)、江苏省自然科学基金(BK20170194, BK20180598)

*E-mail: cheng.liu@hotmail.co.uk

利用前文给出的测量方法,分别对入射至透镜和离开透镜的光场进行重建。图 2(e)为重建得到的扫描物体的振幅及相位分布,图 2(f)为重建得到的透镜面的入射光场相位,图 2(g)为照明光的原始光场相位和重建光场相位的分布对比,两者吻合程度高,从图中的局部放大图可以看出,其误差小于 0.13%。图 3(i)是离开透镜的光场的相位分布,将其减去图 2(f)中照明光的相位,便可以得到图 2(j)所示的待测透镜的透射波前。图 2(k)为测透镜透射波前的真实值和重建值之间的分布对比,从图中的局部放大图可以看出,相位极差(PV 相对误差值)仅为 $0.2/6.28=0.031\lambda$, λ 为波长,证明了基于 ePIE 的透镜透射波前测量方法可以准确地恢复待测透镜的透射波前。

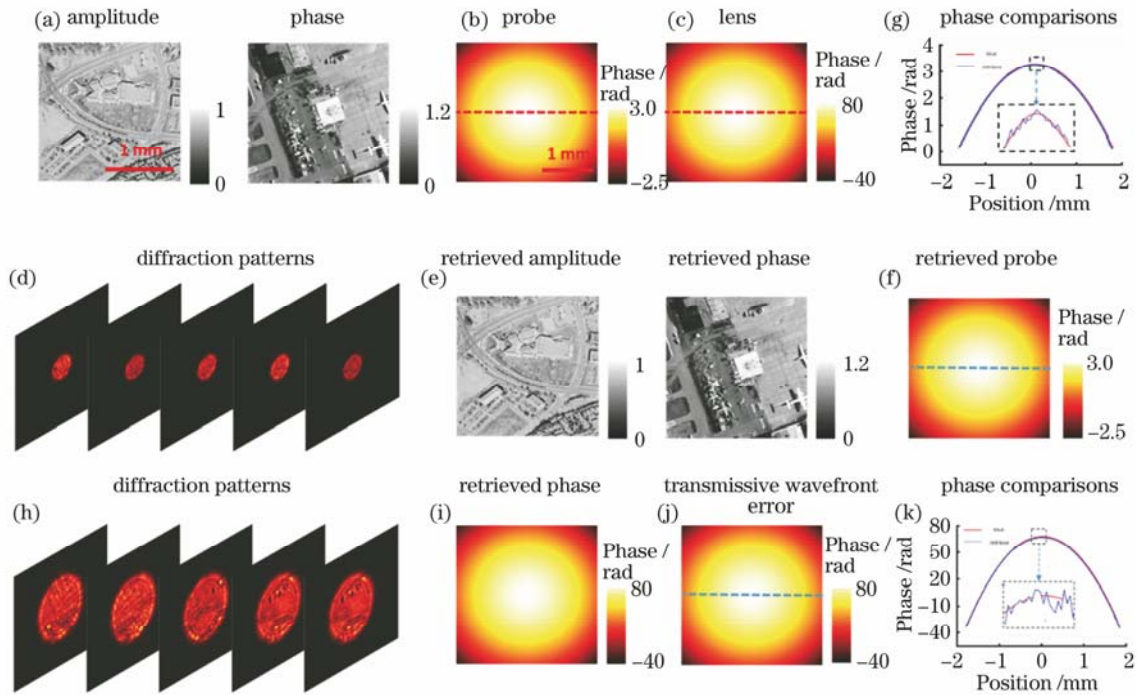


图 2 数值模拟结果。(a)扫描衍射物体的振幅和相位初始值;(b)照射至透镜上的光场相位;(c)待测透镜的真实透射波前分布;(d)无透镜时的探测器表面衍射强度分布;(e)重建的扫描物体的振幅和相位;(f)重建的透镜前表面照明光波前;(g)沿(b)和(f)中虚线的相位;(h)有透镜时探测器表面的衍射强度;(i)重建的透镜透射光场相位;(j)重建的透镜透射波前;(k)为(c)和(j)中虚线位置的截面相位对比

Fig. 2 Numerical simulation results. (a) Original amplitude and phase values of scanning diffraction object; (b) phase of light field illuminated on lens; (c) real transmitting wave-front of lens to be measured; (d) diffraction patterns of detector without lens; (e) retrieved amplitude and phase of scanning object; (f) retrieved phase of light field illuminated on front surface of lens; (g) phase comparison along dotted lines in Figs. 2(b) and 2(f); (h) diffraction patterns of detector with lens; (i) retrieved light field phase of leaving lens; (j) retrieved transmitting wave-front of lens; (k) cross-sectional phase comparison along dotted lines in Figs. 2(c) and 2(j)

收稿日期: 2018-12-20; 修回日期: 2019-01-17; 录用日期: 2019-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(U1730132,61705092)、江苏省自然科学基金(BK20170194,BK20180598)

*E-mail: cheng.liu@hotmail.co.uk

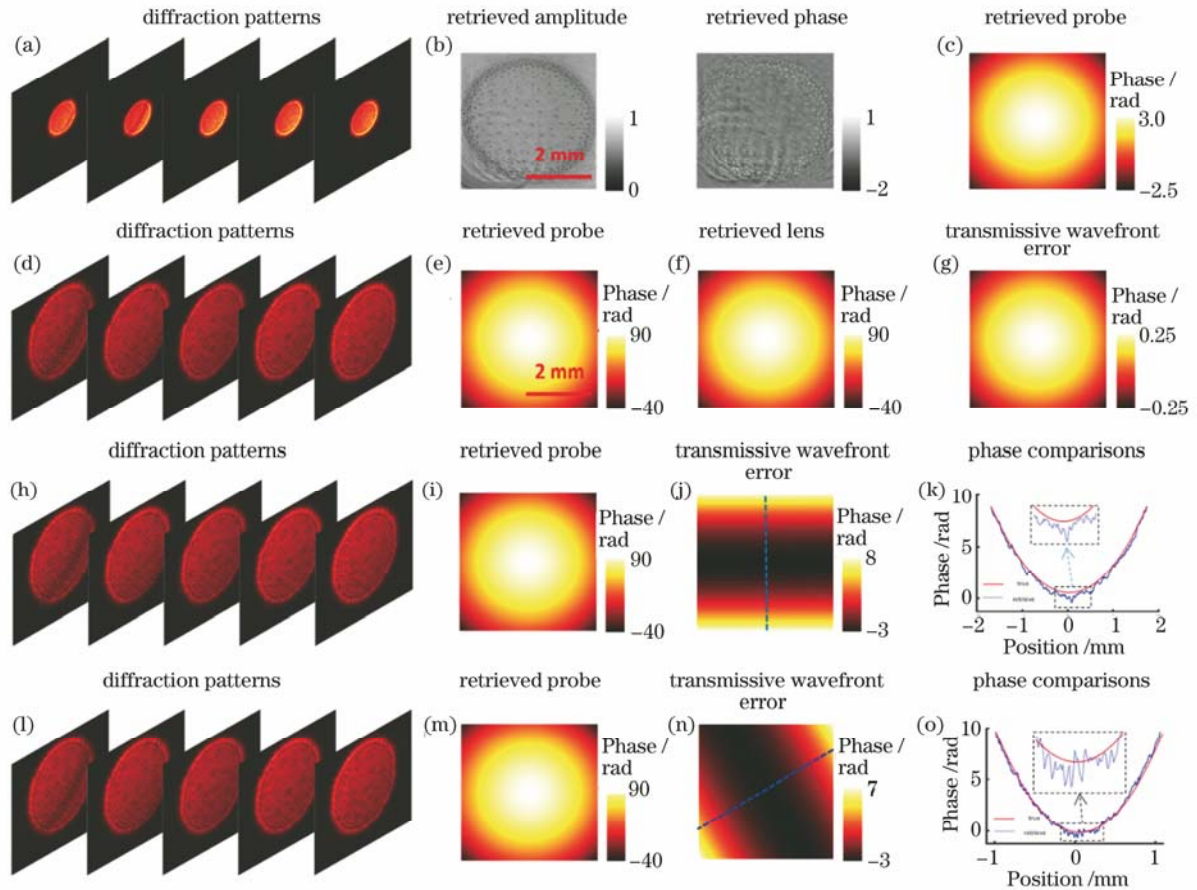


图 3 实验结果。(a)无透镜时的衍射斑;(b)扫描物体的重建振幅和相位;(c)透镜入射光的重建相位;(d)有透镜时的衍射斑;(e)离开透镜光束的相位;(f)透镜的透射波前;(g)测量和理想波前之间的误差;(h)/(l)两种柱透镜加入后的衍射斑;(i)/(m)重建的柱透镜的透射波前;(j)/(n)柱透镜透射波前测量值;(k)/(o)测量值和理论值的误差

Fig. 3 Experimental results. (a) Diffraction patterns without lens; (b) retrieved amplitude and phase of scanning object; (c) retrieved phase of light illuminating on lens; (d) diffraction patterns with lens; (e) phase of light leaving lens; (f) transmitting wave-front of lens; (g) error between measured value and ideal spherical wave-front; (h)/(l) diffraction patterns with two kinds of cylindrical lenses; (i)/(m) retrieved transmitting wave-fronts of cylindrical lenses; (j)/(n) measured transmitting wave-fronts of cylindrical lenses; (k)/(o) error between measured values and theoretical values

在理论模拟的基础上,对该测量方法进行实验验证,实验结果如图 3 所示。待测透镜选择直径为 4 mm 的凸透镜,其设计焦距为 25 cm,材质为 K9 玻璃。图 3(a)为移去透镜时探测器所记录的部分衍射斑强度,图 3(b)为重建得到的扫描物体的振幅和相位,图 3(c)为重建得到的照射至透镜前表面的光场相位。将待测透镜放入光路后,重新记录图 3(d)所示的另一组衍射强度分布,并重建图 3(e)所示的离开透镜光束的波前分布。图 3(f)所示的透镜的透射波前为图 3(e)和图 3(c)的相位差。将图 3(f)减去一个以焦点为中心的理想球面波,其差值在图 3(g)中给出,该差值可以看作是实际透镜的透射波前和理想透镜设计值之间的误差,从图中的参数可以看出,PV 误差为 $0.25/6.28=0.04\lambda$,说明透镜有着良好的加工质量。

为定量测试上述实验测量的准确性,紧贴待测透镜后表面放置参数已知的柱透镜作为额外引入的透镜像散,两柱透镜焦距分别为 1 m 和 0.5 m。再次重复上述实验过程,可以测量得到有柱透镜时的光束透射波前,并将其减去图 3(f)中的透射波前即可以测量得到柱透镜的透射波前,最后将其和理论值进行比较,从而可以准确计算测量误差。图 3(h)和 3(l)分别为放入两块不同焦距柱透镜后所记录的衍射斑分布,重建得到的两柱透

收稿日期: 2018-12-20; 修回日期: 2019-01-17; 录用日期: 2019-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(U1730132,61705092)、江苏省自然科学基金(BK20170194,BK20180598)

*E-mail: cheng.liu@hotmail.co.uk

镜后表面光波波前为图 3(i)和 3(m),它们包含了待测透镜和柱透镜的透射波前信息,将它们减去图 3(f)中的原待测透镜后表面的光束波前即可得到图 3(j)和 3(n)中的柱透镜波前分布。图 3(k)和 3(o)给出了柱透镜透射波前的理论值和实际值之间的比较,两者吻合度较好,从图中的局部放大图可以看出,二者之间的 PV 误差值仅为 $0.375/6.28=0.06\lambda$,充分证明所提出的基于 ePIE 的透镜透射波前测量方法具有较高的测量精度。

为测量该方法的分辨率,在透镜后平面处放置一块 USAF 1951 分辨率板,用同样的方法对其进行成像,重建的强度图如图 4 所示,从中可以看出第 6 组第 4 对线对依旧可以分辨,分辨率可达到 $5.52\ \mu\text{m}$ 。然而如果用 20×20 的 Shack-Hartmann 传感器进行测量,分辨率只有 $3\ \text{mm}/20=150\ \mu\text{m}$ 。可见本文方法的分辨率明显优于 Shack-Hartmann 传感器。

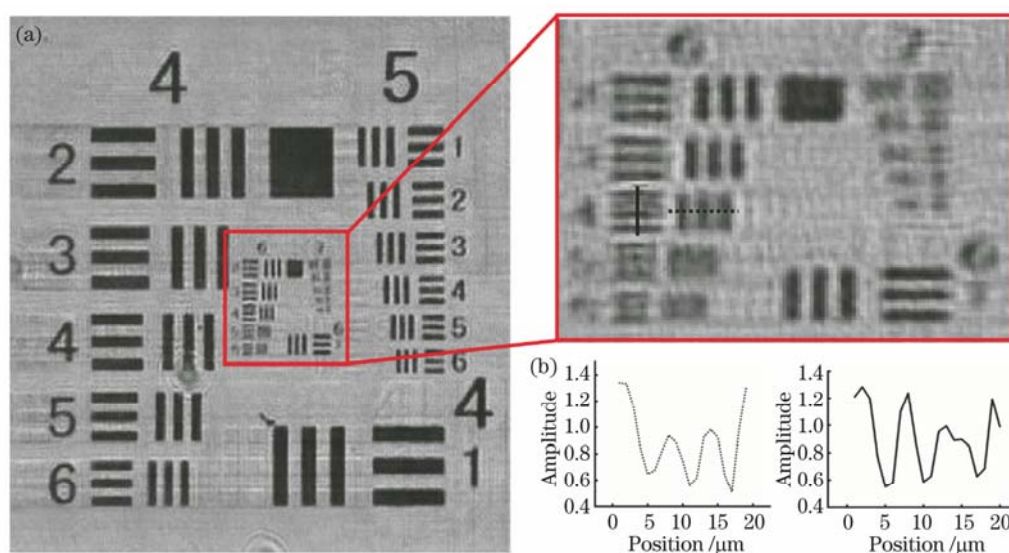


图 4 实验结果。(a) USAF 1951 的恢复结果;(b) (a)划线位置对应的振幅分布

Fig. 4 Experimental results. (a) Restoration result of USAF 1951; (b) amplitude distributions corresponding to underlined positions in locally-magnified image of Fig. 4(a)

4 结论

提出一种基于 ePIE 的透镜透射波前测量方法。将近似平行光照射至待测透镜,并在透镜后放置一物体,并使用探测器记录物体在不同扫描位置处所形成的衍射斑,进而精确重建照射至扫描物体上的光场复振幅(强度和相位)分布,并在此基础上用菲涅耳衍射公式计算透镜后表面的光场分布;移去透镜后再次重复同样的实验步骤,可以测量出入射至透镜的光场分布;将透射光束的相位减去入射光束的相位,即可精确得到透镜的透射波前。这种透镜透射波前测量方法使用共光路系统,不依赖于高质量的参考光,具有操作简便和受外界环境干扰小的优点。数值模拟和实验都证明该方法可以精确实现透镜透射波前的测量,并且分辨率可达到 $5.52\ \mu\text{m}$,有望成为一种光学检测的新工具。

收稿日期: 2018-12-20; 修回日期: 2019-01-17; 录用日期: 2019-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(U1730132,61705092)、江苏省自然科学基金(BK20170194,BK20180598)

*E-mail: cheng.liu@hotmail.co.uk

参考文献

- [1] Feng M C, Liu W Q, Xu L, *et al.* Analysis of the mirror surface errors in a Michelson interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0423002.
冯明春, 刘文清, 徐亮, 等. 迈克耳孙干涉仪中的镜面面形误差研究分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0423002.
- [2] Jiang Y, Bai J, Luo J, *et al.* An error calibration method against aberration in long focal length measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1222002.
江瑶, 白剑, 罗佳, 等. 长焦距测量系统的像差误差校正方法研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1222002.
- [3] Malacara D. *Optical shop testing*[M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [4] Houston J B, Buccini C J, O'Neill P K. A laser unequal path interferometer for the optical shop[J]. *Applied Optics*, 1967, 6(7): 1237-1242.
- [5] Bruning J H, Herriott D R, Gallagher J E, *et al.* Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses[J]. *Applied Optics*, 1974, 13(11): 2693-2703.
- [6] Schulz G, Schwider J. IV interferometric testing of smooth surfaces[J]. *Progress in Optics*, 1976, 13: 93-167.
- [7] Schwider J, Burow R, Elssner K E, *et al.* Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(21): 3421-3433.
- [8] Yoon G Y, Jitsuno T, Nakatsuka M, *et al.* Shack Hartmann wave-front measurement with a large F-number plastic microlens array[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(1): 188-192.
- [9] Cai L Z, Liu Q, Yang X L, *et al.* Sensitivity adjustable contouring by digital holography and a virtual reference wavefront[J]. *Optics Communications*, 2003, 221(1/2/3): 49-54.
- [10] Bruning J H, Herriott D R. A versatile laser interferometer[J]. *Applied Optics*, 1970, 9(9): 2180-2182.
- [11] Hariharan P, Oreb B F, Eiju T. Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(13): 2504-2506.
- [12] Bruning J H, Herriott D R, Gallagher J E, *et al.* Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses[J]. *Applied Optics*, 1974, 13(11): 2693-2703.
- [13] Rimmer M P, Wyant J C. Evaluation of large aberrations using a lateral-shear interferometer having variable shear[J]. *Applied Optics*, 1975, 14(1): 142-150.
- [14] Rimmer M P. Method for evaluating lateral shearing interferograms[J]. *Applied Optics*, 1974, 13(3): 623-629.
- [15] Wyant J C. Use of an ac heterodyne lateral shear interferometer with real-time wavefront correction systems[J]. *Applied Optics*, 1975, 14(11): 2622-2626.
- [16] Wang Y, Chen X, Cao Z, *et al.* Gradient cross-correlation algorithm for scene-based Shack-Hartmann wavefront sensing[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 17549-17562.
- [17] Xia F, Sinefeld D, Li B, *et al.* Two-photon Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(6): 1141-1144.
- [18] Rao C H, Jiang W H, Ling N. Measuring the power-law exponent of an atmospheric turbulence phase power spectrum with a Shack-Hartmann wave-front sensor[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(15): 1008-1010.
- [19] Yao Y D, Liu C, Pan X C, *et al.* Research status and development trend of PIE imaging method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0609001.
姚玉东, 刘诚, 潘兴臣, 等. PIE 成像方法技术现状及发展趋势[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0609001.
- [20] Zheng C, He X L, Liu C, *et al.* A study on the influence of the axial distance error to the image quality of the ptychographic iterative engine[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1011003.
郑晨, 何小亮, 刘诚, 等. 关于轴向距离误差对 PIE 成像质量影响的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1011003.
- [21] Faulkner H M L, Rodenburg J M. Movable aperture lensless transmission microscopy: a novel phase retrieval algorithm[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(2): 023903.

收稿日期: 2018-12-20; 修回日期: 2019-01-17; 录用日期: 2019-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(U1730132,61705092)、江苏省自然科学基金(BK20170194,BK20180598)

*E-mail: cheng.liu@hotmail.co.uk

- [22] Maiden A M, Rodenburg J M. An improved ptychographical phase retrieval algorithm for diffractive imaging[J]. Ultramicroscopy, 2009, 109(10): 1256-1262.
- [23] Pan X C, Veetil S P, Liu C, *et al.* High contrast imaging for weakly diffracting specimens with ptychographical iterative engine[J]. Optics Letters, 2012, 37(16): 3348-3350.
- [24] Faulkner H M L, Rodenburg J M. Error tolerance of an iterative phase retrieval algorithm for moveable illumination microscopy[J]. Ultramicroscopy, 2005, 103(2): 153-164.
- [25] Burdet N, Shi X W, Parks D, *et al.* Evaluation of partial coherence correction in X-ray ptychography[J]. Optics Express, 2015, 23(5): 5452-5467.
- [26] Rodenburg J M. The phase problem, microdiffraction and wavelength-limited resolution:a discussion[J]. Ultramicroscopy, 1989, 27(4): 413-422.
- [27] Maiden A M, Humphry M J, Rodenburg J M. Ptychographic transmission microscopy in three dimensions using a multi-slice approach[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2012, 29(8): 1606-1614.

收稿日期: 2018-12-20; 修回日期: 2019-01-17; 录用日期: 2019-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(U1730132,61705092)、江苏省自然科学基金(BK20170194,BK20180598)

*E-mail: cheng.liu@hotmail.co.uk