

基于全息术的无计算波前传感方法

姚凯男^{1,2} 王建立¹ 吴元昊¹ 王 斌¹ 曹景太¹ 汪宗洋¹ 刘 维³

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 中国科学院大学, 北京 100049
³ 吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012

摘要 为提高波前传感器的波前探测速率,研究了基于全息术的无计算波前传感新方法。在薄全息图近似下,推导出基于快速傅里叶变换(FFT)算法的数值模型,并数值模拟了全息波前传感器对低 8 阶 Zernike 项像差的探测过程。结果表明,波前探测误差均方根值(RMS)为 0.24 rad。搭建实验平台对数值模拟的结果进行了验证,波前探测误差 RMS 值达到 0.29 rad。实验结果表明,基于全息术的无计算波前传感方法可以高效探测低阶 Zernike 像差。

关键词 自适应光学;全息术;波前传感器;无计算

中图分类号 P124; TB133 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1209001

A Computing-Free Wavefront Sensing Method Based on Holography

Yao Kainan^{1,2} Wang Jianli¹ Wu Yuanhao¹ Wang Bin¹ Cao Jingtai¹

Wang Zongyang¹ Liu Wei³

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Department of Communication Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract To increase wavefront detecting speed of the wavefront sensor, a new computing-free method based on holography is researched. With thin hologram approximation, we get the numerical model based on the fast Fourier transform (FFT) algorithm and the first 8 order Zernike aberrations are detected by holographic wavefront sensor under this numerical model. The root-mean-square (RMS) value of detection error is 0.24 rad. An experimental device is set up to validate the numerical simulation in our laboratory and the RMS value of detection error is 0.29 rad. The experimental results indicate that the computing-free wavefront sensing method based on holography can detect the low order Zernike aberrations with high efficiency.

Key words adaptive optics; holography; wavefront sensor; computing-free

OCIS codes 010.1080; 090.1760; 220.1080

1 引 言

自适应光学技术可以实时校正光学系统波前像差,在天文学、眼科学、显微科学和激光技术等方面得到了广泛的应用^[1]。波前传感器是自适应光学系统最重要的组成部分之一,起着系统伺服回路波前

误差传感的作用。通过实时连续测定望远镜入瞳面上动态入射波前的相位畸变,为波前校正器实时提供控制信号,使光学系统达到或接近衍射受限的像质水平^[2]。因此,波前探测器的运行速度直接影响自适应光学系统的闭环带宽。自适应光学系统目前

收稿日期: 2013-04-18; 收到修改稿日期: 2013-06-04

基金项目: 国家 863 计划(2011AAXX1003)

作者简介: 姚凯男(1987—),男,博士研究生,主要从事自适应光学与波前传感器方面的研究。

E-mail: yaokainan001@126.com

导师简介: 王建立(1971—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像望远镜总体技术等方面的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn

使用的波前传感器主要为通过测量波前斜率获得波前相位的哈特曼传感器^[3-6]。哈特曼波前传感器需要通过复杂的矩阵运算获得波前校正器的驱动信号,繁重的计算量严重限制了自适应光学系统闭环带宽的进一步提高。2000年,Neil等^[7-8]提出了一种模式波前传感器方案,这种波前传感器能极大地降低波前重构的计算量。

2008年,Ghebremichael等^[9]将多元全息光学元件应用于模式波前传感器,并使用雪崩光电二极管阵列作为探测器,提出了一种全息波前传感器,其通过探测全息像面相对光强,直接对应 Zernike 项系数,完全无需计算,并且具有对光强闪烁不敏感的特点,适用于高速、强闪烁环境^[10-12]。刘长海等^[13-17]也在上述工作的基础上,使用平面波替代球面光波在夫琅禾费面成像,达到了提高衍射效率的目的。2012年以来,Zepp等^[18-19]又报道了相关的最新成果。全息波前传感器的研究已经成为自适应光学领域的研究热点。

本文对基于全息术的无计算波前传感方法进行了理论分析;对低 8 阶 Zernike 项表征的波前像差探测性能进行了数值模拟,并在实验室中利用振幅型全息图建立了全息波前传感器的实验验证平台,对低 8 阶 Zernike 像差进行了探测与校正。

2 理论分析

全息波前传感方法本质上讲是一种模式波前传感器,其基本原理如图 1 所示,利用计算机模拟一束具有某一 Zernike 模式最小幅度像差 $A_{\min}Z_i$ 的光波与一束会聚于点 A 的球面参考光波干涉,产生子全息图 1。另一束具有相同模式最大幅度像差 $A_{\max}Z_i$ 的光波与一束会聚于点 B 的球面参考光波干涉,形成子全息图 2。利用多元全息元件的特性,将两幅子全息图叠加,形成一幅包含着该种模式像差信息的多元全息图。当用一束具有同种模式像差 A_iZ_i (A_i 介于 A_{\min} 与 A_{\max} 之间) 的光波照射全息图时,将同时复现出两束球面波,分别会聚于点 A 与点 B。根据 Neil 等^[7] 关于模式波前传感器的理论分析,点 A 与点 B 的相对光强与 Zernike 模式系数 Z_i 直接相关。若要测量更多 Zernike 模式的像差,根据多元全息元件的特性,相应叠加更多对子全息图,并控制

相干球面波的波矢方向,使聚焦的光斑在空间上分离,通过测量每对光斑的相对光强,得到相应的 Zernike 模式幅度,从而拟合出畸变波前。

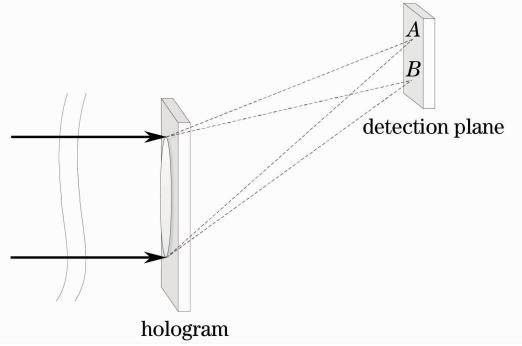


图 1 全息波前传感原理图

Fig. 1 Schematic diagram of holographic wavefront sensor

第 m 幅子全息图中,参考球面波会聚于点 $(x_{R,m}, y_{R,m}, z_{R,m})$, 表示为

$$U_{R,m}(r_{R,m}) = \frac{U_{R,m,0}}{|R_m - R|} \exp\{-ik_m[(x - x_{R,m})^2 + (y - y_{R,m})^2 + (z - z_{R,m})^2]^{1/2}\}, \quad (1)$$

式中 $k_m = 2\pi/\lambda_m$, 对于所有 m , 有 $\lambda_m = \lambda$, $(x_{R,m}, y_{R,m}, z_{R,m})$ 为全息像平面会聚点坐标, $U_{R,m,0}$ 为离开会聚点单位距离处的光波振幅值, λ 为波长, $|R_m - R|$ 为波面与球面波会聚点的距离, $r_{R,m}$ 等价于 $(x_{R,m}, y_{R,m}, z_{R,m})$ 。

第 m 幅子全息图中,另一束干涉光为像差偏置光波 $U_{S,m}$, 表示为

$$U_{S,m}(r_{S,m}) = U_{S,m,0} \exp[iW(r_{S,m})], \quad (2)$$

式中 $U_{S,m,0}$ 为振幅项, $W(r_{S,m})$ 为相位函数。利用正交 Zernike 圆多项式将相位函数展开为 $W(r_{S,m}) = \sum_j \epsilon_{m,j} Z_j$, 其中 $\epsilon_{m,j}$ 为 Zernike 项像差系数。在以下分析中,忽略全息图的多元性,仅考虑某一子全息图。

用一束具有随机像差的再现光波 $U_P(r_P, r)$ 照射全息图,根据标量衍射理论,像空间光场复振幅分布 $U_d(r_d)$ 表示为

$$U_d(r_d) = \int \tau(r_S, r_R, r) U_P(r_P, r) G(r_d, r) dr,$$

式中 $\tau(r_S, r_R, r)$ 为薄振幅型全息图透射率函数,格林函数 $G(r_d, r)$ 表示为

$$G(r_d, r) = \frac{\exp\{ik_d[(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2 + (z_d - z)^2]^{1/2}\}}{z_d}, \quad (3)$$

式中 (x_d, y_d, z_d) 为全息像平面坐标, (x, y, z) 为全息图平面坐标, k_d 为波数。

在满足菲涅耳近似条件的情况下,对(3)式二次相位因子做如下展开:

$$[(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2 + (z_d - z)^2]^{1/2} \approx z_d \left[1 + \frac{(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2}{2z_d^2} \right] + z \left[1 - \frac{(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2}{2z_d^2} \right]. \quad (4)$$

考虑全息图厚度 L , 像平面光场复振幅分布为

$$U_d(r_d) \approx \int_{-\infty}^{\infty} dV \exp \left[-ik_s z \left(1 - \frac{\xi_R}{z_R} \right) \right] \exp(-ik_s \xi_R) \exp \left[ik_d z \left(1 - \frac{\xi_d}{z_d} \right) \right] \exp(ik_d \xi_d) \times \exp[-iW(x, y)] \Pi(x - a, y - b) U_P(r_P), \quad (5)$$

式中 $\xi_a = \frac{(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2}{2z_a}$, $\alpha = \{R, d\}$ 。 Π 为光瞳函数, 将积分范围限定于光瞳, 全息图体积 $V = abL$ 。

若忽略全息图厚度(薄全息图假设), (5)式进一步简化为

$$U_d(r_d) \approx \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy \exp \left[-i\pi \frac{(x_R - x)^2 + (y_R - y)^2}{\lambda z_R} \right] \exp \left[i\pi \frac{(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2}{\lambda z_d} \right] \times \exp[-iW(x, y)] \Pi(x - a, y - b) U_P(x_P, y_P). \quad (6)$$

根据惠更斯-菲涅耳原理, (6)式可表示为标准菲涅耳近似下的傍轴基尔霍夫衍射积分。对(6)式二次相位因子展开并整理, 可得:

$$U_d(r_d) \approx \exp \left(i\pi \frac{x_d^2 + y_d^2}{\lambda z} \right) \iint \exp \left[-i\pi \frac{(x_R - x)^2 + (y_R - y)^2}{\lambda z} \right] \exp \left(i\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda z} \right) \times \exp[-iW(x, y)] \Pi(x - a, y - b) U_P(x_P, y_P) \exp \left(-i2\pi \frac{xx_d + yy_d}{\lambda z} \right) dx dy \approx \exp \left(i\pi \frac{x_d^2 + y_d^2}{\lambda z} \right) \times \mathcal{F} \left\{ \exp \left[-i\pi \frac{(x_R - x)^2 + (y_R - y)^2}{\lambda z} \right] \exp[-iW(x, y)] \times \Pi(x - a, y - b) U_P(x_P, y_P) \exp \left(i\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda z} \right) \right\}, \quad (7)$$

式中 $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 表示傅里叶变换。

通过以上分析, 将薄全息图假设下的菲涅耳积分简化为傅里叶变换形式, 方便利用计算机进行快速傅里叶变换(FFT)运算, 从而通过数值方法求解全息像平面光场的复振幅分布。

3 数值模拟

基于前述理论对全息波前传感器进行数值模拟以验证无计算波前传感方法的可行性。模拟参数选择如下: 振幅型全息图采样点数 600×600 , 工作波长 632.8 nm , 全息图通光孔径 6 mm , 像平面距离全息图平面 1500 mm , 聚焦光斑离轴大于 1 cm 。模拟对低 8 阶 Zernike 项像差 $Z(2, 0)$, $Z(2, -2)$, $Z(2, 2)$, $Z(3, -1)$, $Z(3, 1)$, $Z(4, 0)$, $Z(3, -3)$, $Z(3, 3)$ 进行探测。其中加载 $Z(2, 0)$, $Z(2, -2)$, $Z(2, 2)$ 像差 $\pm 2\pi$ (峰谷值, PV), $Z(3, -1)$, $Z(3, 1)$, $Z(4, 0)$, $Z(3, -3)$, $Z(3, 3)$ 像差 $\pm 1\pi$ (PV), 共叠加 16 幅子全息图, 生成的全息图如图 2 所示。

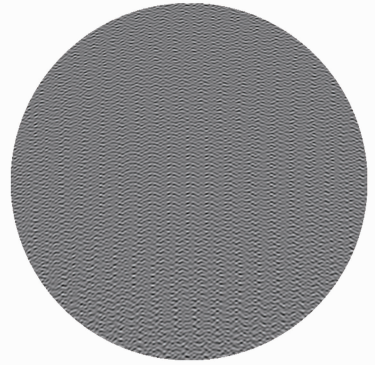


图 2 计算全息图

Fig. 2 Computer generated hologram

假设用具有一定波前畸变的光波照射全息图, 并根据理论分析中所给出的方法计算全息像平面光场分布, 当模拟入射光波仅具有 $Z(2, 0)$ 像差时, 全息像平面光强分布如图 3 所示, 其中图 3(b) 为平面波入射时全息像平面光斑图样, 从左至右各对光斑依次代表 $Z(3, -3)$, $Z(3, 1)$, $Z(2, 2)$, $Z(2, 0)$, $Z(2, -2)$, $Z(3, -1)$, $Z(4, 0)$, $Z(3, 3)$ 像差所复现

出的两束球面波的会聚点,观察每对光斑图样可以看出具有该阶像差特征的点扩散图样,其中 $Z(2, 2)$, $Z(2, 0)$, $Z(2, -2)$ 像差由于加载了较大 PV 值的像差而具有更大的扩散程度,而 $Z(2, 0)$ 对应光斑扩散最严重,这是由于相同 PV 值下 $Z(2, 0)$ 像差具有更大均方根(RMS)值。图 3(a), (c) 是分别具有系数为 $+\pi$ 与 $-\pi$ 的 $Z(2, 0)$ 像差的光波照射全息图

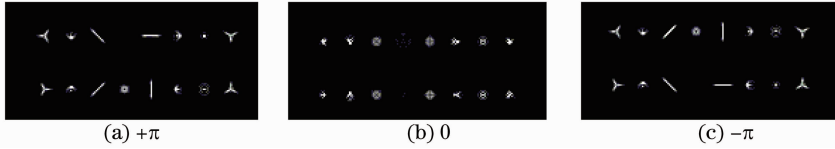


图 3 全息像平面光斑

Fig. 3 Spots on holographic image plane

实验中,在全息像面上选择 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的探测孔径,只对孔径以内的光斑能量进行探测,并计算一阶矩以表示相对光强。使用仅具有某一项像差的入射光波照射全息图,并连续改变该项像差幅度,可以得到所对应的相对光强数据,从而得到该项像差的响应灵敏度。其中 $Z(2, 0)$ 像差响应灵敏度曲线如图 4 所示。

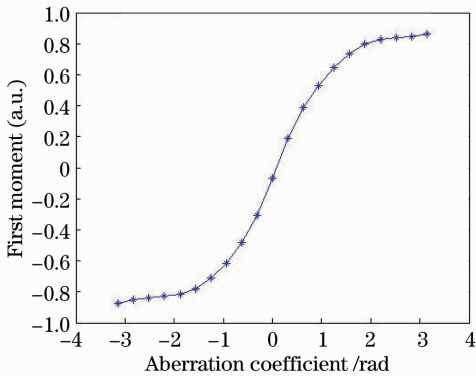


图 4 $Z(2, 0)$ 像差响应灵敏度

Fig. 4 Sensitivity response curve of $Z(2, 0)$

如图 4 所示,可以看出响应灵敏度曲线在小像差近似情况下具有良好线性度,在实验中进行一次

时,全息像面的光强分布,观察代表 $Z(2, 0)$ 像差的两束球面波的会聚光斑,可以看出一对光斑的相对光强发生了明显变化,入射畸变波前越是接近某一最大幅度加载像差,所再现出来的相对应的一束球面波会聚点光斑的峰值光强越强,而另一束球面波的会聚点光斑光强越弱。

初始标定,得到每一项被加载的 Zernike 项像差响应灵敏度曲线,然后利用响应灵敏度曲线的线性段,对具有波前畸变的入射光波的每一项 Zernike 像差分别进行探测,从而拟合出畸变波前。模拟入射光波畸变波前如图 5(a) 所示。通过处于线性区间内的相对光强数据求解 Zernike 项系数,拟合波前如图 5(b) 所示,波前探测误差如图 5(c) 所示,波前探测误差 RMS 值为 0.24 rad 。

通过以上数值模拟实验能够得到如下结论:在小像差近似的情况下,基于全息术的无计算波前传感方法通过探测全息像面光斑相对光强,利用事先标定的响应灵敏度函数,直接得到每一项 Zernike 像差系数,实现了对畸变波前的准确探测。

4 实验验证

在上述理论分析和数值模拟的基础上,在实验室中基于自研的振幅型全息图,利用如图 6(a) 所示光路,对利用全息波前传感器探测波前像差的可行性进行实验验证,实验装置实物如图 6(b) 所示。

实验中采用工作波长为 632.8 nm 的激光器,出射激光由空间光滤波器后,被准直成为标准平面

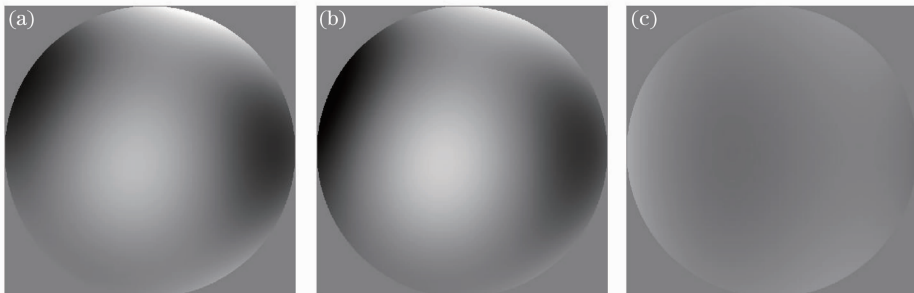
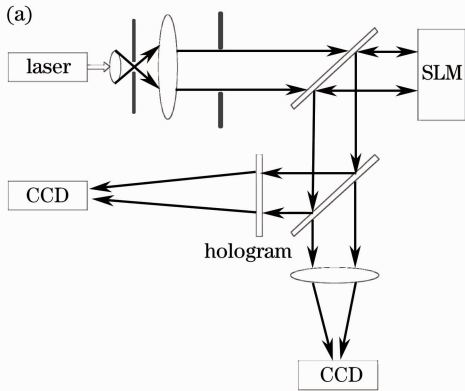


图 5 (a) 畸变波前;(b)探测波前;(c)波前探测误差

Fig. 5 (a) Distorted wavefront; (b) detected wavefront; (c) wavefront detection error

波。系统中用可变光阑实现光束口径与全息图通光孔径的匹配,然后通过液晶空间光调制器(SLM)加载被测波前。具有畸变波前的光波在分光棱镜分光后,一路进入全息波前传感器,另一路通过一个焦距400 mm的透镜在 CCD 相机焦面成像。为了完成全



息波前传感器设计,研制了 600×600 点的振幅型全息图,通光孔径为 6 mm,加载 Zernike 像差与数值模拟中的相同。受限于实验中使用的 CCD 光学尺寸,分两次对全息像面光斑进行成像,然后通过选取适当的探测孔径,测量光斑的相对光强。

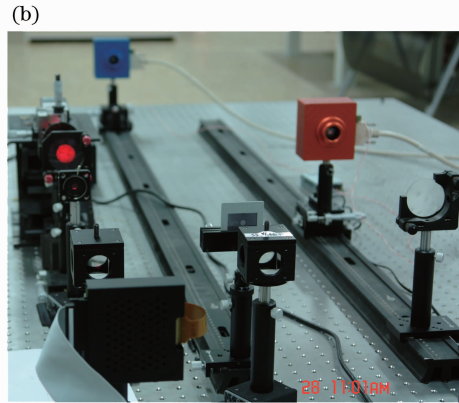


图 6 (a)实验光路图; (b)实验装置实物图

Fig. 6 (a) Schematic of optical path; (b) image of experiment device

在进行测量前,先利用液晶空间光调制器单独加载某一项 Zernike 像差,并且对该项像差幅度进行连续调整,得到一组全息像面光斑在探测孔径内的相对光强,此即该项 Zernike 像差全息波前传感器的探测响应灵敏度曲线的标定过程。采用相同的方法依次标定,得到每一项 Zernike 像差的响应灵

敏度曲线。然后利用液晶空间光调制器加载被测像差,如图 7(a)所示。波前发生畸变后,全息像面光斑如图 7(b)、(c)所示,成像相机采集图像如图 7(d)所示。观察全息像面光斑,可以看出 8 对光斑的亮度与形状存在不同程度的差异。

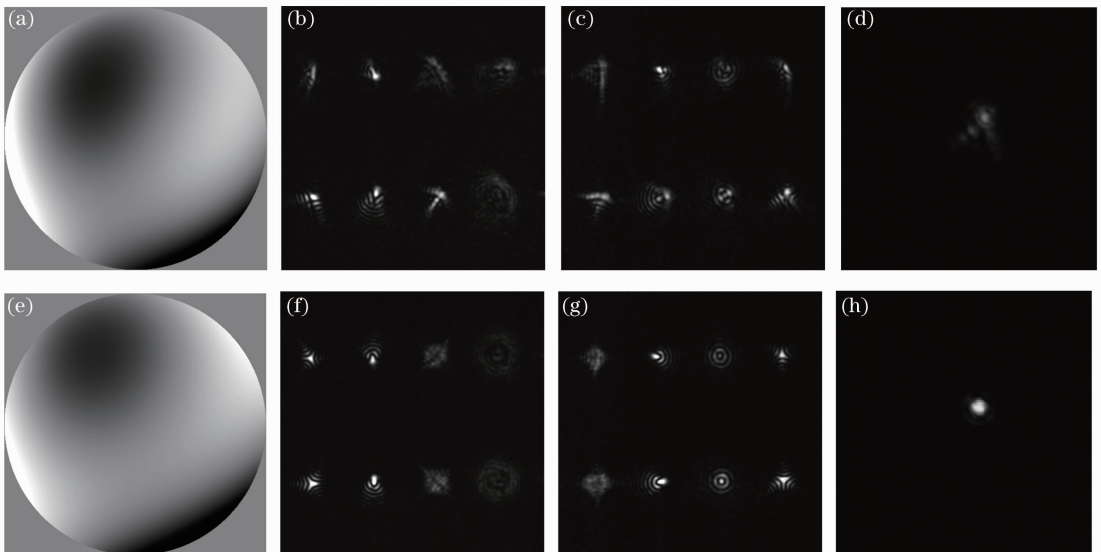


图 7 (a)液晶空间光调制器加载的被测像差;(b),(c)加载像差后全息像面图像;(d)加载像差后成像 CCD 相机焦面图像;(e)全息波前传感器探测到的波前像差;(f),(g)探测到的像差被校正后的全息像面图像;(h)探测到的像差被校正后成像 CCD 相机焦面图像

Fig. 7 (a) Aberration on SLM; (b), (c) spots on holographic image plane with aberration; (d) image on CCD focus plane with aberration; (e) detected aberration with holographic wavefront sensor; (f), (g) spots on holographic image plane with aberration corrected; (h) image on CCD focus plane with aberration corrected

分别测量 8 对光斑的相对光强,从而得到 8 项 Zernike 项系数,并拟合出波前,如图 7(e)所示。在液晶空间光调制器加载像差的基础上,对全息波前传感器检测到的波前畸变进行校正,全息像面光斑如图 7(f)、(g)所示,成像相机采集图像如图 7(h)所示。

由图 7(a)、(e),可以计算出波前探测误差 RMS 值为 0.29 rad。观察图 7(f)、(g),已经接近于图 3(b)中数值模拟平面波入射时的全息像面光斑图样,各阶像差图样清晰,可见实验结果与数值模拟实验达到了较好的一致性。由图 7(b)、(c)可知,当入射波前发生畸变后,虽然各对光斑形状发生了明显变化,但在探测孔径内的光斑相对光强可以体现该项 Zernike 像差系数的幅度。实验结果表明:探测孔径选取对探测精度有较大的影响,应通过多次实验选取合适的孔径以减少探测误差。利用液晶空间光调制器对探测到的波前畸变进行校正后,成像相机采集到的焦面图像如图 7(h)所示。对比图 7(d)、(h),可知成像相机焦面能量集中度明显提高。

5 结 论

从理论分析和数值模拟两方面对基于全息术的无计算波前传感方法进行系统的研究,并搭建实验平台,利用该方法实现了对低 8 阶 Zernike 像差的高速探测与校正。实验结果表明,全息波前传感器对低 8 阶 Zernike 像差系数测量准确,拟合面形误差 RMS 值为 0.29 rad。

未来将通过三个方面来改进工作:1)白光入射时,在衍射光斑发生弥散的情况下,将对全息波前传感方法的有效性进行研究。2)使用 PSD 替代 CCD 来实现相对光强的探测以提高探测速度。3)拟利用变形镜镜面模式代替 Zernike 模式作为全息图加载模式,以摆脱对计算机的依赖,从而提高探测频率^[20-21]。

参 考 文 献

- Liu Ying, Ma Jianqiang, He Ting, *et al.*. Hybrid simulated annealing-hill climbing algorithm for fast aberration correction without wavefront sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 213-219.
刘莹,马剑强,何挺,等.模拟退火-爬山混合算法用于无波前传感器快速像差校正[J].*光学精密工程*, 2012, 20(2): 213-219.
- Zhou Renzhong. *Adaptive Optics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996. 109-110.
周仁忠.自适应光学[M].北京:国防工业出版社,1996. 109-110.
- B C Platt, R Shack. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing [J]. *J Refractive Surgery*, 2001, 17(5): 573-577.
- Jia Jianlu, Wang Jianli, Zhao Jinyu, *et al.*. Adaptive optical wave-front processor based on FPGA [J]. *Optics and Precision*

- Engineering*, 2011, 19(8): 1716-1722.
贾建禄,王建立,赵金宇,等.基于FPGA的自适应光学系统波前处理器[J].*光学精密工程*, 2011, 19(8): 1716-1722.
- Fan Zihua, Wu Yuanhao, Jia Jianlu, *et al.*. Image restoration based on real time wavefront information [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1350-1356.
赵金宇,吴元昊,贾建禄,等.基于实时波前信息的图像复原[J].*光学精密工程*, 2012, 20(6): 1350-1356.
- Fan Zihua, Wang Chunhong, Jiang Wenhan. Accumulator-based wavefront slope processor for Shack-Hartmann sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(3): 501-507.
樊志华,王春鸿,姜文汉.基于累加器的哈特曼-夏克波前斜率处理器[J].*光学精密工程*, 2011, 19(3): 501-507.
- M A A Neil, M J Booth, T Wilson. New modal wavefront sensor: a theoretical analysis [J]. *J Opt Soc Am A*, 2000, 17(6): 1098-1107.
- M A A Neil, M J Booth, T Wilson. Closed-loop aberration correction by use of a modal Zernike wavefront sensor [J]. *Opt Lett*, 2000, 25(15): 1083-1085.
- F Ghebremichael, G P Andersen, K S Gurley. Holography-based wavefront sensing [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(4): A62-A69.
- G P Andersen, L Dussan, F Ghebremichael, *et al.*. Holographic wavefront sensor [J]. *Opt Eng*, 2009, 48(8): 085801.
- Geoff Andersen, F Ghebremichael, Jeff Baker, *et al.*. Holographic adaptive laser optics system [C]. SPIE, 2012, 8380: 83800D.
- G P Andersen, F Ghebremichael, Ravi Gaddipati, *et al.*. Fast computer-free holographic adaptive optics [C]. SPIE, 2012, 8447: 84472L.
- Liu Changhai, Jiang Zongfu. Holographic modal wavefront sensor: theoretical analysis and simulation [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(s2): 147-152.
刘长海,姜宗福.全息模式波前传感器:理论分析与模拟[J].*中国激光*, 2009, 36(s2): 147-152.
- Liu Changhai, Xi Fengjie, Ma Haotong, *et al.*. Modal wavefront sensor based on binary phase-only multiplexed computer-generated hologram [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(27): 5117-5124.
- Liu Changhai, Jiang Zongfu, Huang Shengyang, *et al.*. Aberration detection using holographic model wavefront sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3069-3075.
刘长海,姜宗福,黄盛扬,等.全息模式波前传感器的像差探测[J].*光学学报*, 2010, 30(11): 3069-3075.
- Liu Changhai, Xi Fengjie, Huang Shengyang, *et al.*. Performance analysis of multiplexed phase computer-generated hologram for modal wavefront sensing [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(11): 1631-1639.
- Liu Changhai, Xi Fengjie, Huang Shengyang, *et al.*. Multi-mode-biased wavefront sensor employing multiplexed computer-generated holographic element [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(2): 0214002.
刘长海,习锋杰,黄盛扬,等.基于复用计算全息元件的多阶模式偏置波前传感器[J].*中国激光*, 2011, 38(2): 0214002.
- A Zepp. Holographic wavefront sensing with spatial light modulator in context of horizontal light propagation [C]. SPIE, 2012, 8535: 85350I.
- Shihao Dong, Tobias Haist, Wolfgang Osten, *et al.*. Holographic combination of low resolution Shack-Hartmann sensor and holography-based modal Zernike wavefront sensor [C]. SPIE, 2012, 8447: 84473Y.
- Lin Xudong, Liu Xinyue, Wang Jianli, *et al.*. Development and performance test of the 961-element deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0601001.
林旭东,刘欣悦,王建立,等.961单元变形镜研制及性能测试[J].*光学学报*, 2013, 33(6): 0601001.
- Lin Xudong, Liu Xinyue, Wang Jianli, *et al.*. Performance test and experimental study of the correction capability of the 137-element deformable mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 258-264.
林旭东,刘欣悦,王建立,等.137单元变形镜性能测试及校正能力的实验研究[J].*光学精密工程*, 2013, 21(2): 258-264.