

CAPIS 技术探测波前畸变的实验研究

柯熙政, 杨珂*, 张颖

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 计算光场自适应光学成像(CAPIS)技术能够同时记录信号的位置和方向,从光场信息中可得到畸变波前斜率,从而重构波前。研究了 CAPIS 技术探测光学波前畸变,给出了数值计算模型并进行了仿真分析。结果表明,CAPIS 技术可准确地探测低阶像差波前,波前残差方均根值小于 0.1λ 。建立实验光路并实现了对低阶像差波前的探测,波前残差方均根值小于 0.5λ 。仿真和实验结果均表明,CAPIS 技术可有效地探测低阶像差波前,该结果对探索大视场波前探测方法具有重要意义。

关键词 自适应光学; 波前畸变; 计算光场自适应光学成像; Zernike 像差; 波前探测; 光场信息

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.120101

Experimental Study on Wavefront Distortion Detection Using CAPIS Technology

Ke Xizheng, Yang Ke*, Zhang Ying

School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract The technology of computationally adaptive plenoptic imaging system (CAPIS) can simultaneously record the position and direction of a signal, obtain the distorted wavefront slope from the light field information, and thus perform the wavefront reconstruction. This study investigates the optical wavefront distortion detected by the CAPIS technology, and provides a numerical calculation model for simulation analysis. The results denote that the CAPIS technology can accurately detect a low-order aberration wavefront. Furthermore, the root mean square value of the wavefront residual is less than 0.1λ . The experimental light path is established, and the detection of the low-order aberration wavefront is realized and the root mean square value of the wavefront residual is less than 0.5λ . The simulation and experimental results denote that the CAPIS technology can effectively detect a low-order aberration wavefront, which is considerably significant for exploring one large-field wavefront detection method.

Key words adaptive optics; wavefront aberration; computationally adaptive plenoptic imaging system; Zernike aberration; wavefront detection; light field information

OCIS codes 010.1080; 010.1300; 040.1880; 090.1000

1 引言

激光在大气中传输时,湍流效应会引起光波波前畸变、光强起伏和光束漂移等现象,降低了系统成像质量和光束质量,恶化了无线光通信系统性能^[1-2]。计算光场自适应光学成像(CAPIS)技术将光场成像系统应用于自适应光学波前探测领域,具有结构简单、测量动态范围大、探测视场大等优点^[3]。因此,研究 CAPIS 技术探测光学波前畸变有广阔的应用前景。

1992年,Adelson等^[4]设计了一套计算光场采样系统,实现了光场信息的采集。2006年,Chew等^[5]建立了一套计算光场成像结构,从傅里叶光学的角度分析了计算光场的成像过程。2008年,Rodríguez-Ramos等^[6]以透明的十字架为信标,用 CAPIS 技术进行了波前探测,得到了子孔径图像。2013年,Lü等^[7]提出了基于 CAPIS 技术的波前探测方法,可以探测低阶像差波前,有望解决小像差波前探测问题。2013年,张锐等^[8]分析了斜率估计信

收稿日期: 2018-12-13; 修回日期: 2019-01-03; 录用日期: 2019-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(61377080,60977054)、陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)

* E-mail: 1126037739@qq.com

号的线性范围对重构精度的影响,结果表明,斜率信号的线性范围越大,重构精度越高。2014年,许洁平等^[9]研究了一种基于相位掩模的计算光场成像模拟方法,可以得到较好的波前重构精度。目前,对CAPIS技术探测畸变波前的研究大多都停留在理论阶段,并未进行实验验证。

本文分析了CAPIS技术探测光学波前畸变的基本原理,建立了基于CAPIS技术的波前探测实验装置,利用液晶-空间光调制器(LC-SLM)相位调制特性产生的低阶像差验证了CAPIS技术对低阶像差波前的探测能力,仿真模拟和实验结果证明,CAPIS技术可有效探测低阶像差波前。

2 波前探测原理

CAPIS技术和哈特曼波前传感器测量波前有相似之处^[9]。如图1(a)所示,哈特曼传感器是在入

瞳处放置一块微透镜阵列,将入射光瞳分割成许多子孔径,每个子孔径的子透镜对物体成像,在探测器的靶面上形成光斑。光斑相对中心的偏移量反映了子孔径内入射波前的平均斜率,计算各子孔径光斑的质心即可得平均斜率,从而重构出入射波前的相位^[10]。

如图1(b)所示,CAPIS技术是在入瞳焦面处放置一块微透镜阵列,入瞳透镜首先在其焦面上对物体成像,然后微透镜阵列将焦面分割成许多子区域,各子区域对应的微透镜在焦面处形成相对低分辨率子图像。如图2(a)所示,当入瞳面为理想平面没有相位畸变时,来自入瞳处的三个点(A、B和C)的光能将聚焦在焦面中心,光波通过微透镜阵列中心后成像,只有中心微透镜产生的子图像的像素才能获得这三个点的光能。如图2(b)所示,当入瞳面存在波前畸变时。根据畸变量的大小,来自A、B和C三个点的光能将聚焦在其他微透镜上,只有该微透镜产生的子图像的相应像素才能获得该点的光能,根据畸变量的大小,来自A点的光能聚焦在下方的微透镜上,下方微透镜产生的子图像的相应像素获得A点的光能;来自B点和C点的光能分别聚焦在中心和上方的微透镜上,中心和上方微透镜产生的子图像的相应像素分别获得B点和C点的光能。因此通过微透镜所成子图像的亮暗即可判断入瞳面上各处的波前倾斜量,从而重构整个波前,微透镜的作用相当于一个带通滤波器,一个微透镜只能通过一定范围内的波前倾斜^[9-11]。

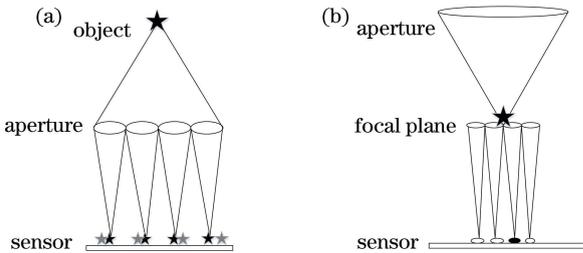


图1 波前传感器结构示意图。(a)哈特曼波前传感器;
(b)CAPIS结构
Fig. 1 Structural diagram of wavefront sensor.
(a) Hartmann wavefront sensor; (b) structure of CAPIS

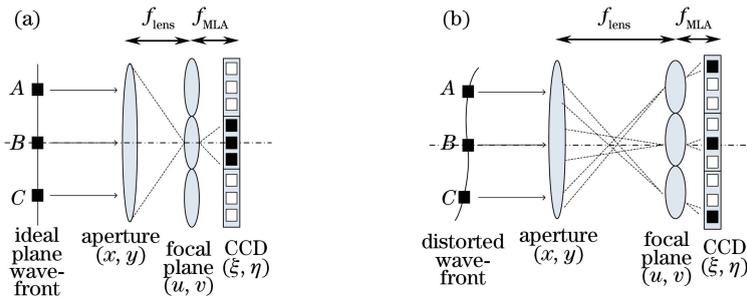


图2 CAPIS结构探测波前原理图。(a)理想平面波前;(b)畸变波前

Fig. 2 Principle diagram of wavefront detection using CAPIS structure. (a) Ideal plane wavefront ;(b)distorted wavefront

哈特曼波前传感器只能获取某一点源到达入瞳面所携带的位置信息,成像器件单纯记录了入射至该点光线的亮度叠加信息,完全丢失了光线的方向信息。CAPIS技术能够获取光线的方向信息和位置信息,可以完整地反映入射光场信息,利用像素的重组能得到通过不同子光瞳所成物体的成像信息,通过对比计算,得到不同视角上的波前信息,进而探

测畸变波前,为大视场波前探测以及多层共轭自适应光学中多视角波前畸变信息的获得提供一个重要的研究方向。

若入瞳的波前相位为 $\varphi(x, y)$,光瞳函数为 $P(x, y)$,带通滤波函数为 $H(u, v)$, (u, v) 为微透镜阵列中微透镜的位置坐标,假设微透镜是一个宽度为 d 的方形透镜,微透镜总数为 $2M \times 2N$,那么

中心在 \$(u', v')\$ 的微透镜对应的滤波函数为^[10-11]

$$H(u, v) = \begin{cases} 1, & u' - d/2 \leq u \leq u' + d/2 \text{ and} \\ & v' - d/2 \leq v \leq v' + d/2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

第 \$(m, n)\$ 块微透镜对应的子图像为^[12]

$$I_{m,n}(\xi, \eta) \propto |\mathcal{F}^{-1} [H(u, v) \mathcal{F}[P(x, y) \exp[j\varphi(x, y)]]]|^2, \quad (2)$$

式中: \$I_{m,n}(\xi, \eta)\$ 为第 \$(m, n)\$ 块微透镜所成子图像的第 \$(\xi, \eta)\$ 个像素值; \$\mathcal{F}\$ 和 \$\mathcal{F}^{-1}\$ 分别为傅里叶变换和傅里叶逆变换, \$m = -M+1, -M+2, \dots, M, n = -N+1, -N+2, \dots, N\$。

得到子图像后, 波前斜率为^[10-12]

$$\begin{cases} G_\xi(\xi, \eta) \propto \frac{\sum_{m=-M+1}^M \sum_{n=-N+1}^N I_{m,n}(\xi, \eta)(nd - \delta u)}{\sum_{m=-M+1}^M \sum_{n=-N+1}^N I_{m,n}(\xi, \eta)} \\ G_\eta(\xi, \eta) \propto \frac{\sum_{m=-M+1}^M \sum_{n=-N+1}^N I_{m,n}(\xi, \eta)(md - \delta v)}{\sum_{m=-M+1}^M \sum_{n=-N+1}^N I_{m,n}(\xi, \eta)} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: \$G_\xi(\xi, \eta), G_\eta(\xi, \eta)\$ 分别为 \$\xi, \eta\$ 方向的斜率; \$\delta u, \delta v\$ 分别为成像微透镜相对于中心微透镜位置的偏移量。

最后根据模式法重构波前, 一个完整的波前 \$\varphi(\xi, \eta)\$ 可以用 Zernike 多项式展开为^[13-14]

$$\varphi(\xi, \eta) = \sum_{k=1}^l a_k Z_k(\xi, \eta), \quad (4)$$

式中: \$l\$ 为模式数; \$a_k\$ 为第 \$k\$ 项 Zernike 多项式系数; \$Z_k\$ 为第 \$k\$ 项 Zernike 多项式。模式法进行波前重构的本质是建立 Zernike 多项式与波前传感器所探测的波前斜率之间的关系, 再求解出 Zernike 系数 \$a_k\$, 最后由(4)式重构出波前。

对(4)式求偏导数可得波前斜率与 Zernike 系数的关系为^[14]

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi(\xi, \eta)}{\partial \xi} = G_\xi(\xi, \eta) = \sum_{k=1}^l a_k \frac{\partial Z_k(\xi, \eta)}{\partial \xi} = \sum_{k=1}^l a_k Z_{\xi k}(\xi, \eta) \\ \frac{\partial \varphi(\xi, \eta)}{\partial \eta} = G_\eta(\xi, \eta) = \sum_{k=1}^l a_k \frac{\partial Z_k(\xi, \eta)}{\partial \eta} = \sum_{k=1}^l a_k Z_{\eta k}(\xi, \eta) \end{cases} \quad (5)$$

若 CAPIS 系统共有 \$r\$ 个斜率向量, 取 Zernike 多项式的前 \$s\$ 项进行波前重构可以表示为^[14]

$$\begin{bmatrix} G_\xi(1) \\ G_\eta(1) \\ G_\xi(2) \\ G_\eta(2) \\ \vdots \\ G_\xi(r) \\ G_\eta(r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{\xi 1}(1) & Z_{\xi 2}(1) & \cdots & Z_{\xi s}(1) \\ Z_{\eta 1}(1) & Z_{\eta 2}(1) & \cdots & Z_{\eta s}(1) \\ Z_{\xi 1}(2) & Z_{\xi 2}(2) & \cdots & Z_{\xi s}(2) \\ Z_{\eta 1}(2) & Z_{\eta 2}(2) & \cdots & Z_{\eta s}(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{\xi 1}(r) & Z_{\xi 2}(r) & \cdots & Z_{\xi s}(r) \\ Z_{\eta 1}(r) & Z_{\eta 2}(r) & \cdots & Z_{\eta s}(r) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_s \end{bmatrix}, \quad (6)$$

(6)式表示成矩阵形式为

$$\mathbf{G} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{A}, \quad (7)$$

式中: \$\mathbf{G}\$ 为波前斜率向量; \$\mathbf{Z}\$ 为阶波前重构矩阵; \$\mathbf{A}\$ 为待定的各模式系数向量。

利用 CAPIS 技术测量出波前斜率 \$\mathbf{G}\$ 后, 再用奇异值分解法求出波前重构矩阵 \$\mathbf{Z}\$ 的广义逆 \$\mathbf{Z}^{-}\$, 即得系数向量 \$\mathbf{A}\$ 在最小二乘意义下的最小范数解为^[14]

$$\mathbf{A} = \mathbf{Z}^{-} \cdot \mathbf{G}. \quad (8)$$

由于焦点图像的分布不均匀, 波前重构矩阵严重病态化, 借助金字塔波前传感器的波前重构原理, 可以通过仿真计算得到波前重构矩阵 \$\mathbf{Z}\$, 即在(6)式中分别使 \$a_s (s=1, 2, \dots, n', n'\$ 为自然数) 为固定常数 \$t\$ (即波前重构矩阵的测量系数), 分别得到 \$G_s\$, 使之作为 \$\mathbf{Z}\$ 的第 \$s\$ 列, 从而求出响应矩阵 \$\mathbf{Z}\$。此时, (8)式也相应变为^[15]

$$\mathbf{A} = t\mathbf{Z}^{-1}\mathbf{G}, \quad (9)$$

将系数向量 \$\mathbf{A}\$ 代入(4)式即得完整的波前 \$\varphi(\xi, \eta)\$。

残余波前的方均根(RMS)值常作为衡量波前重构精度的评判标准, 其值越小表示重构的精度越高, 残余波前 RMS 值的计算公式为^[16]

$$\varphi_{\text{RMS}} = \sqrt{\langle \varphi^2(\xi, \eta) \rangle - \langle \varphi(\xi, \eta) \rangle^2}, \quad (10)$$

式中: \$\langle \varphi^2(\xi, \eta) \rangle\$ 为残余波前平方的平均值; \$\langle \varphi(\xi, \eta) \rangle^2\$ 为残余波前平均值的平方。

3 数值仿真研究

利用 Zernike 多项式模拟输入待测像差, 在探测面得到远场光斑阵列, 用(3)式对远场光斑阵列进行斜率估计, 再根据模式法用(9)式和(4)式重构波前。

仿真参数选取如下: 入射光波长 \$\lambda = 650 \text{ nm}\$, 入瞳透镜直径 \$D = 3 \text{ mm}\$, 焦距 \$F = 120 \text{ mm}\$, 微透镜阵列每个子透镜直径 \$d = 250 \text{ }\mu\text{m}\$, 焦距 \$f = 10 \text{ mm}\$, 共有微透镜 \$40 \times 40\$ 个, 为使微透镜阵列中相邻微透镜

产生的光斑没有混叠,应使入瞳的 F 值和微透镜的 F 值相等^[10]。图 3 给出了 CAPIS 技术对输入待测像差分别为像散像差、彗差像差和三瓣叶像差的重构结果,输入的待测像差的 RMS 值均为 0.5λ , λ 为入射光的波长,采用 λ 作为波前单位,以衡量像差大小。图 3(a)~(c)分别为待测的像散像差分布、重

构的像散像差分布和两者的残余像差分布;图 3(d)~(f)分别为待测的彗差像差分布、重构的彗差像差分布和残余像差分布;图 3(g)~(i)分别为待测的三瓣叶像差分布、重构的三瓣叶像差分布和残余像差分布。其中, x 、 y 分别为相位波动二维分布图的横、纵坐标。

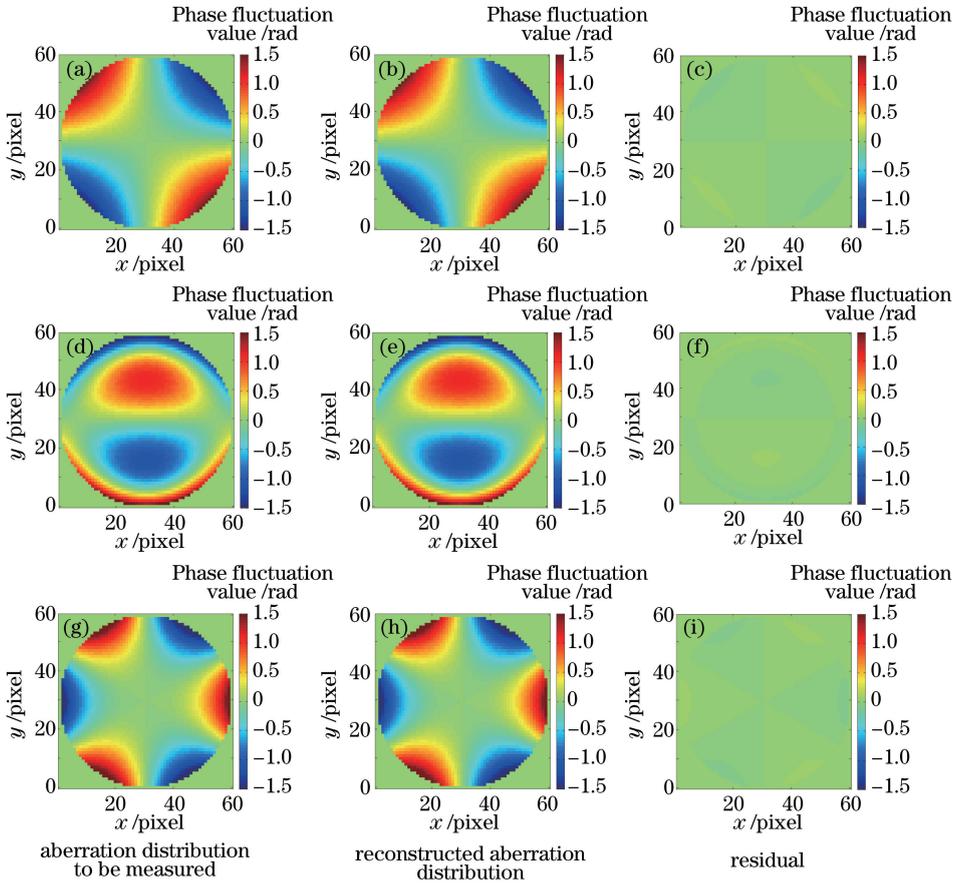


图 3 像差重构结果。(a)(b)(c)像散;(d)(e)(f)彗差;(g)(h)(i)三瓣叶

Fig. 3 Reconstructed results of aberration. (a)(b)(c) Astigmatism; (d)(e)(f) coma; (g)(h)(i) three-leaf

分别将任意一组 Zernike 多项式前 10 项和前 15 项的线性组合像差作为待测像差,以验证 CAPIS 技术对低阶组合像差的探测能力,结果如图 4 所示。图 4(a)~(c)分别为待测的前 10 项 Zernike 多项式组合像差(RMS 值为 1λ)、重构的前 10 项 Zernike 多项式组合像差分布和残余像差分布;图 4(d)~(f)分别为待测的前 15 项 Zernike 多项式组合像差(RMS 值为 2λ)、重构的前 15 项 Zernike 多项式组合像差分布和残余像差分布。

通过对比图 3 和图 4 中输入的待测像差分布和 CAPIS 技术重构的像差分布,以及分析两者的残余像差分布可知,待测像差分布和重构像差分布面型基本一致,误差较小。CAPIS 技术重构的像散像差、彗差像差、三瓣叶像差、前 10 项 Zernike 多项式

组合像差和前 15 项 Zernike 多项式组合像差的波前残余 RMS 值分别为 0.021λ , 0.024λ , 0.028λ , 0.041λ , 0.049λ , 均小于 0.1λ , 重构精度较高,说明 CAPIS 技术可以有效地探测低阶像差波前。

4 实验研究

为了验证 CAPIS 技术探测波前畸变的可行性及其性能,设计了如图 5 所示的实验方案。实验选用 650 nm 的半导体激光器作为光源,光束经偏振片 P1 后,入射到由透镜 L1 和 L2 组成的 $4f$ 系统中扩束准直,准直后的光束垂直入射到孔径光阑(AD),再由分光棱镜 BS1 分束后经偏振片 P2 入射到空间光调制器,空间光调制器对平行光进行相位调制模拟低阶像差,并将调制后的光束经入瞳透镜

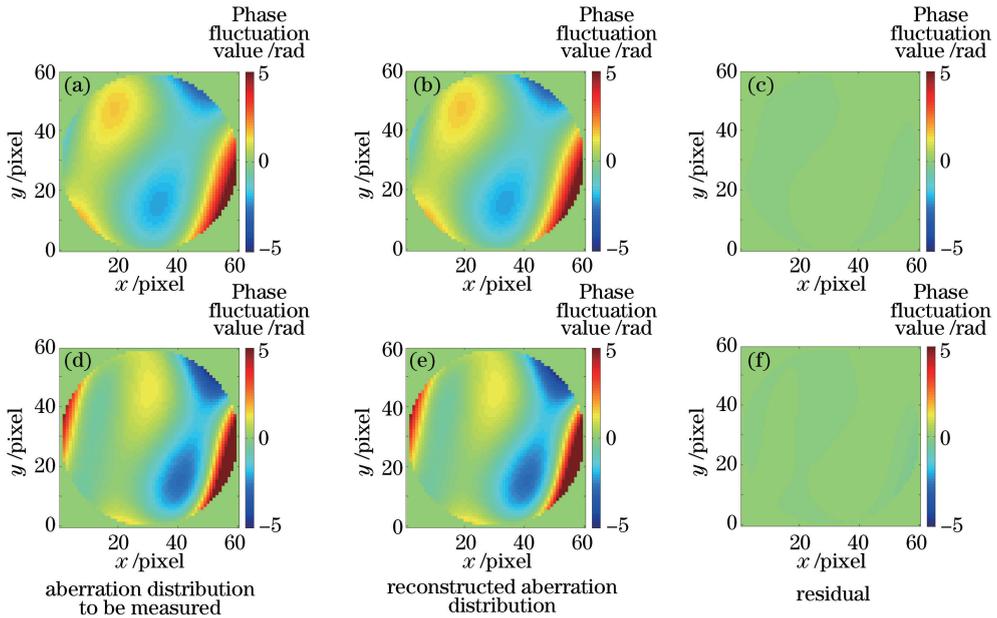


图4 组合像差重构结果。(a)(b)(c)前10项 Zernike 多项式组合;(d)(e)(f)前15项 Zernike 多项式组合
 Fig. 4 Reconstructed results of combined aberration. (a)(b)(c) First 10 Zernike polynomial combination;
 (d)(e)(f) first 15 Zernike polynomial combination

L3 垂直入射到其焦面处的微透镜阵列,微透镜阵列在其焦面处的 CCD 探测器上形成待测波前的远场光斑阵列,最后通过模式法对采集到的光斑阵列进行波前重构,从而实现对准变光束的波前探测。其

中入瞳透镜到微透镜阵列的距离为入瞳透镜焦距 120 mm,1 cm×1 cm 尺寸的微透镜阵列,每个子透镜直径为 250 μm,总共有 40×40 个微透镜,微透镜阵列到 CCD 探测器的距离为微透镜阵列焦距 10 mm,探测器选用像素尺寸为 5.5 μm×5.5 μm,帧率为 8 frame/s 的 MV-E 系列工业相机。

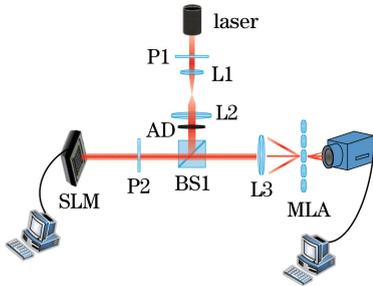


图5 实验装置图

Fig. 5 Diagram of experimental setup

在波前探测实验中,实验参数与仿真参数相同,图6~图10分别给出了像散像差、彗像差、三瓣叶像差、前10项 Zernike 多项式组合像差和前15项 Zernike 多项式组合像差的重构结果,每种像差的重构结果中,图(a)为 CCD 采集到的远场光斑阵列,图(b)为空间光调制器加载的实验待测像差分布,图(c)为 CAPIS 技术利用远场光斑重构的像差分布,图(d)为待测像差和重构像差两者的残余像差分布。

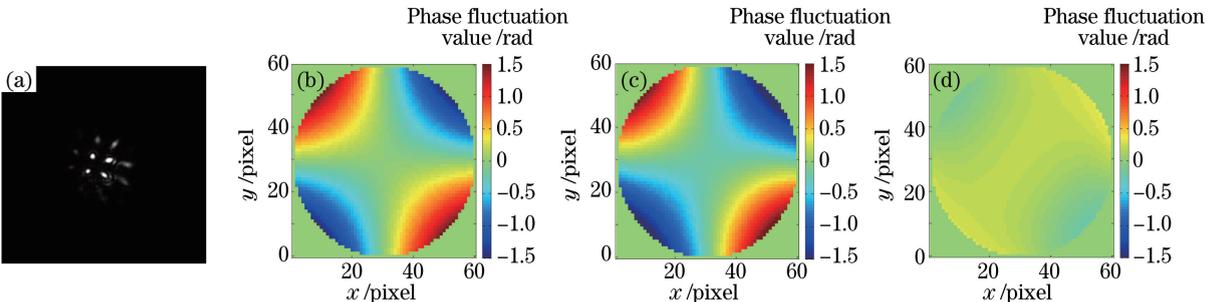


图6 像散像差重构结果。(a)探测器上光斑阵列;(b)待测像散像差分布;(c)重构像差分布;(d)残差分布

Fig. 6 Reconstructed results of astigmatic aberration. (a) Light spot array on detector; (b) astigmatic aberration distribution to be measured; (c) reconstructed aberration distribution; (d) residual distribution

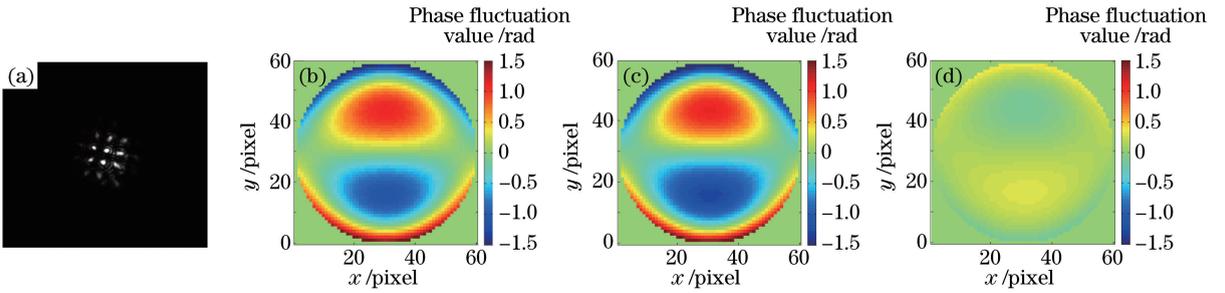


图 7 彗差像差重构结果。(a)探测器上光斑阵列;(b)待测彗差像差分布;(c)重构像差分布;(d)残差分布
Fig. 7 Reconstructed results of coma aberration. (a) Light spot array on detector; (b) coma aberration distribution to be measured; (c) reconstructed aberration distribution; (d) residual distribution

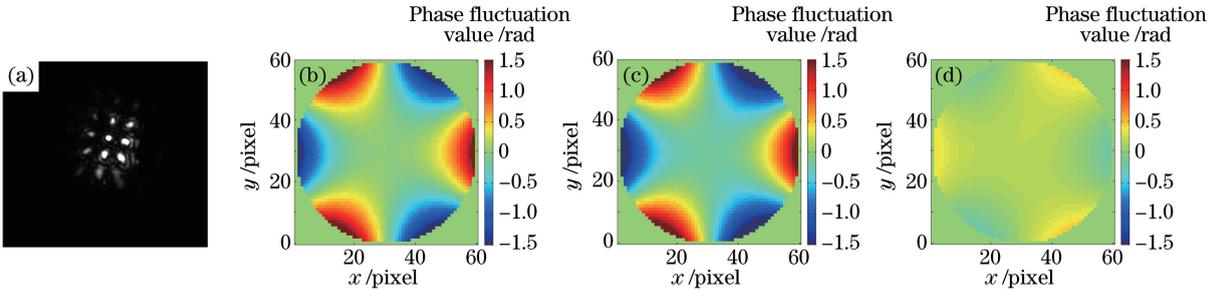


图 8 三瓣叶像差重构结果。(a)探测器上光斑阵列;(b)待测三瓣叶像差分布;(c)重构像差分布;(d)残差分布
Fig. 8 Reconstructed results of three-leaf aberration. (a) Light spot array on detector; (b) three-leaf aberration distribution to be measured; (c) reconstructed aberration distribution; (d) residual distribution

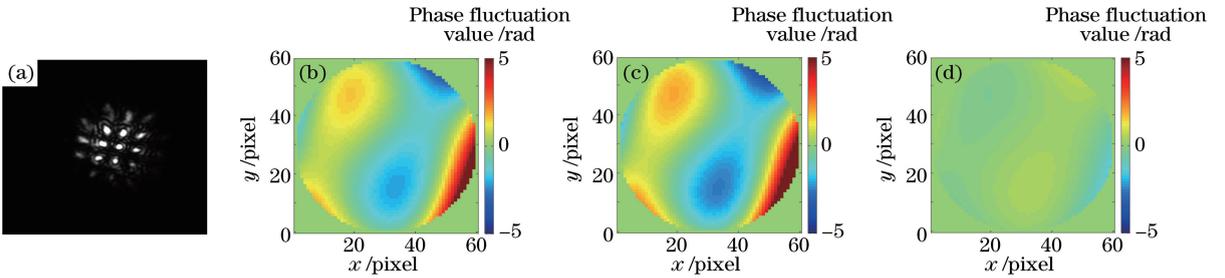


图 9 前 10 项 Zernike 多项式组合像差重构结果。(a)探测器上光斑阵列;(b)待测的组合像差分布;
(c)重构的像差分布;(d)残差分布
Fig. 9 Reconstructed results of first 10 Zernike combination aberration. (a) Light spot array on detector; (b) combined aberration distribution to be measured; (c) reconstructed aberration distribution; (d) residual distribution

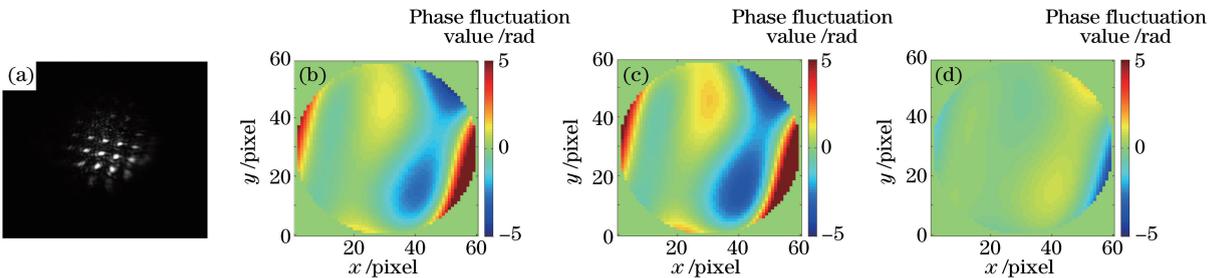


图 10 前 15 项 Zernike 多项式组合像差重构结果。(a)探测器上光斑阵列;(b)待测的组合像差分布;
(c)重构的像差分布;(d)残差分布
Fig. 10 Reconstructed results of first 15 Zernike combination aberration. (a) Light spot array on detector; (b) combined aberration distribution to be measured; (c) reconstructed aberration distribution; (d) residual distribution

如图 6(a)所示,加载像散像差为实验待测像差时,经 CAPIS 系统,CCD 探测器上形成了 4 个亮光斑,并且周围存在一部分杂散光;如图 7(a)所示,加载彗差像差为实验待测像差时,CCD 探测器上形成了 6 个亮光斑,光斑的位置相对于像散像差的光斑位置有明显变化,CCD 探测器上也出现明显的污点和坏点;如图 8(a)所示,加载三瓣叶像差为实验待测像差时,CCD 探测器上形成 8 个亮光斑,部分光斑光强减弱,同时杂散光增多;如图 9(a)和图 10(a)所示,加载前 10 项 Zernike 多项式组合像差和前 15 项 Zernike 多项式组合像差为实验待测像差时,远场光斑阵列扩散的范围增大,CCD 探测器上形成更多的远场光斑,杂散光扩散、增强,污点和坏点也同

时增多,光斑的位置相对于像散像差、彗差像差、三瓣叶像差的光斑位置也发生了一定变化,说明通过 CAPIS 系统获得的远场光斑阵列能够反映待测的波前像差种类。

分别对比图 6~10 中的(b)图和(c)图所示的实验待测像差分布和 CAPIS 技术利用远场光斑阵列重构的像差分布可知,实验待测像差分布和重构像差分布面型基本一致,误差较小。CAPIS 技术重构的像散像差、彗差像差、三瓣叶像差、前 10 项 Zernike 多项式组合像差和前 15 项 Zernike 多项式组合像差的波前残差 RMS 值分别为 0.091λ , 0.109λ , 0.116λ , 0.307λ , 0.342λ , 均小于 0.5λ , 实验误差较小,说明 CAPIS 技术可以探测低阶像差波前。

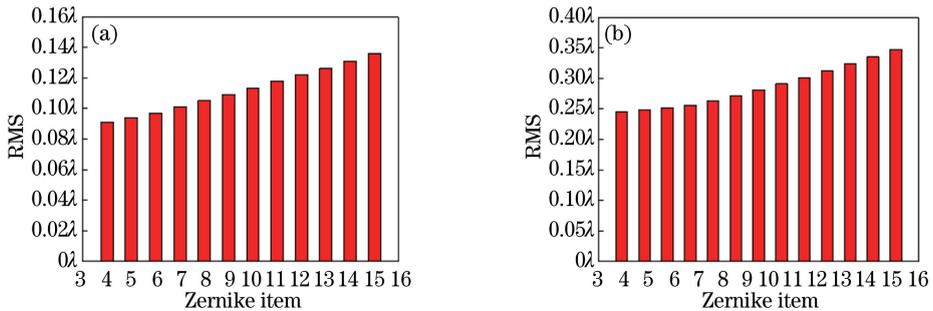


图 11 Zernike 像差探测结果的 RMS 值。(a)单阶 Zernike 像差;(b)组合像差

Fig. 11 RMS values of detection results Zernike aberrations. (a) Single-order Zernike aberration; (b) combination aberration

图 11(a)给出了 CAPIS 技术对前 15 阶单阶像差波前探测结果的波前残差 RMS 值,可以看出, CAPIS 技术重构的前 15 阶单阶像差波前残差 RMS 值较小,重构精度较高。图 11(b)给出了 CAPIS 技术对 Zernike 像差前 4 项、前 5 项、一直到前 15 项组合像差波前探测结果的波前残差 RMS 值,可以看出,随着输入像差的增大,波前残差的 RMS 值逐渐变大,但均小于 0.5λ 。从图 11 可以看出,单阶像差波前残差的 RMS 值比组合像差小,重构效果优于组合像差,这是因为待测像差越大,远场光斑的扩散范围越大,越容易受到 CCD 噪声、杂散光的影响,导致重构精度降低。

由于 CAPIS 技术严格要求微透镜阵列位于入瞳透镜的焦面位置,探测器位于微透镜阵列的焦面位置,但在采集图像和计算波前的过程中,微透镜阵列和探测器位置误差以及光路的装调误差、激光器光强不稳定、杂散光和 CCD 噪声都严重地影响了探测精度,使得实验结果较仿真结果精度有所下降,下一步工作将寻找更加精密的微调节手段与微加工技术,使实验效果更好。

5 结 论

从理论上分析了 CAPIS 技术探测光学波前畸变的基本原理,使用数值仿真和实验的方法研究了 CAPIS 技术对低阶像差波前的探测效果,结果表明:1) 仿真条件下, CAPIS 技术探测得到的波前残差方均根值小于 0.1λ ; 2) 实验条件下, CAPIS 技术探测得到的波前残差方均根值小于 0.5λ , 单项 Zernike 像差的探测效果优于低阶组合 Zernike 像差; 3) 待测像差越大,远场光斑阵列的扩散范围就越大,越容易受到杂散光、噪声等因素的影响,探测精度越低。CAPIS 技术探测波前畸变的研究,为复杂环境中的大视场波前探测以及多层共轭自适应光学系统中多视角波前信息的获取奠定了基础。

通过建立 CAPIS 技术探测波前畸变的实验装置,证明了其探测低阶像差波前的可行性,但探测精度不高,无法满足实际应用需求,下一步的工作重点将是对波前重构结果进行优化以及应用更加精密的微调节手段与微加工技术,提高波前重构精度,以实现其在大视场波前探测领域以及多层共轭自适应光

学闭环系统中的实际应用。

参 考 文 献

- [1] Li X Y, Zhang P, Tong S F. Bit error rate performance for modulating retro-reflector free space optical communication system based on adaptive threshold under atmospheric turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0606001.
李晓燕, 张鹏, 佟首峰. 大气湍流影响下基于自适应判决门限的逆向调制自由空间光通信系统误码率性能分析[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0606001.
- [2] Wang Y R, Mei H P, Kang L, *et al.* Experimental investigation on retro-reflective laser imaging in turbulent atmosphere[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0401008.
王钰茹, 梅海平, 康丽, 等. 湍流大气中折返路径激光成像探测实验[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401008.
- [3] Lü Y, Ning Y, Ma H T, *et al.* Research on computationally adaptive plenoptic imaging[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(3): 180075.
吕洋, 宁禹, 马浩统, 等. 计算光场自适应光学成像技术研究[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 180075.
- [4] Adelson E H, Wang J Y A. Single lens stereo with a plenoptic camera[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 99-106.
- [5] Chew T Y, Clare R M, Lane R G. A comparison of the Shack-Hartmann and pyramid wavefront sensors[J]. Optics Communications, 2006, 268(2): 189-195.
- [6] Rodríguez-Ramos J M, Femenía Castellá B, Pérez Nava F, *et al.* Wavefront and distance measurement using the CAFADIS camera [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7015: 70155Q.
- [7] Lü Y, Zhang X Z, Ma H T, *et al.* Large viewing field wavefront sensing by using a lightfield system [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8905: 89052T.
- [8] Zhang R, Yang J S, Tian Y, *et al.* Wavefront phase recovery from the plenoptic camera [J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(2): 32-39.
张锐, 杨金生, 田雨, 等. 焦面哈特曼传感器波前相位复原[J]. 光电工程, 2013, 40(2): 32-39.
- [9] Xu J P, Liang Y H, Jiang P Z. Performance analysis of light field wave-front sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s2): s201001.
许洁平, 梁永辉, 蒋鹏志. 光场相机波前传感器性能分析[J]. 光学学报, 2014, 34(s2): s201001.
- [10] Clare R M, Lane R G. Wave-front sensing from subdivision of the focal plane with a lenslet array[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2005, 22(1): 117-125.
- [11] Zeng W H, Ning Y, Du S J. Hartmann phase retrieval method based on light field information[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 110101.
曾文华, 宁禹, 杜少军. 基于光场信息的哈特曼相位复原方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 110101.
- [12] Esposito S, Riccardi A. Pyramid wavefront sensor behavior in partial correction adaptive optic systems [J]. Astronomy & Astrophysics, 2001, 369(2): L9-L12.
- [13] Yan Z J, Yang P Q. Modal reconstruction for three-dimensional wavefront of atmosphere turbulence in star oriented multi-conjugate adaptive optics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 1113002.
颜召军, 杨朋千. 星向多层共轭自适应光学大气湍流三维波前模式复原算法分析[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1113002.
- [14] Guo G Y, Fan Z W, Yu J, *et al.* Wavefront detection technology based on Shark-Hartmann theory[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(5): 823-829.
郭广妍, 樊仲维, 余锦, 等. 基于 Shark-Hartmann 理论的波前探测技术研究[J]. 应用光学, 2014, 35(5): 823-829.
- [15] Wang J X. Research on the technology of unmodulated quadrilateral pyramid wavefront sensor [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2011: 42-43.
王建新. 无调制四棱锥波前传感器的技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011: 42-43.
- [16] Meng Q B, Qi Y J, Lu Z X, *et al.* Analysis of effect of ambient temperature variation on measurement accuracy of Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0810001.
孟庆宾, 齐月静, 卢增雄, 等. 环境温度变化对夏克-哈特曼波前传感器测量精度影响分析[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0810001.