

相位恢复波前传感器测量精度的定量分析

马鑫雪^{1,2} 王建立¹ 王 斌^{1*} 汪宗洋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 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了验证相位恢复波前传感器的性能, 搭建了相位恢复传感器和 Zygo 干涉仪对不同波前畸变进行比较测量的实验平台。采用液晶空间光调制器产生的单项像差来验证相位恢复传感器对各种像差的检测能力, 把相位恢复测量结果与高精度的 Zygo 干涉仪测量结果进行比较分析, 结果表明在面形误差分布及误差的峰谷(PV)值和均方根(RMS)值上, 两者具有一致性, 对于波前 RMS 的测量精度达到 $3\lambda/1000$ 左右, 这说明相位恢复测量方法的可行性和准确性。

关键词 测量; 相位恢复; 波前传感器; 液晶空间光调制器; Zygo 干涉仪; 像差

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1028001

Quantitative Analysis of the Measurement Precision of Phase Retrieval Wavefront Sensor

Ma Xinxue^{1,2} Wang Jianli¹ Wang Bin¹ Wang Zongyang¹

(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)

Abstract In order to validate the performance of phase retrieval wavefront sensor (PRWS), an experimental setup based on the PRWS method comparing with Zygo interferometer is built. The liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM) is utilized to produce single aberration and random aberration, and the ability of PRWS measurement for any aberration is validated. The experimental results demonstrate that agreement is obtained among the errors distribution, peak valley (PV) value and root mean square (RMS) value of Zygo interferometer. The measurement precision of wavefront is $3\lambda/1000$ (RMS). Therefore, the feasibility and accuracy of the proposed method can be confirmed.

Key words measurement; phase retrieval; wavefront sensor; liquid crystal spatial light modulator; Zygo interferometer; aberration

OCIS codes 120.5050; 120.3180; 100.2960

1 引 言

光学加工过程中的镜面面形在位实时检测及光学系统装调与使用过程中波像差的动态测量是目前传统光学检测设备很难完成的^[1-3]。相位恢复

(PR)波前传感技术(PRWS)^[4-8]是一种基于焦面图像信息波前解算的焦平面波前探测技术,其原理是通过采集多幅给定离焦量的图像^[9-14],通过傅里叶光学方法解算得到光学系统的波前相位信息。系统

收稿日期: 2013-01-25; **收到修改稿日期**: 2013-03-18

基金项目: 国家 863 计划 (2011AA8082035)

作者简介: 马鑫雪(1987—),女,博士研究生,主要从事相位恢复算法、最优化算法以及波前探测等方面的研究。

E-mail: maxinxue@gmail.com

导师简介: 王建立(1971—),男,博士,研究员,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

* **通信联系人**。E-mail: eatingbeen@hotmail.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

硬件构成简单、不受环境(尤其是震动)影响,可对光学元件及系统进行动态检测^[7,15],在光学加工、系统装调、主动光学、自适应光学等领域具有很好的应用前景。

本文介绍了相位恢复波前传感的原理,搭建了基于相位恢复测量方法的波前传感器的实验装置,采用液晶空间光调制器(LC-SLM)产生的单项像差来验证相位恢复传感器对各种像差的检测能力,把相位恢复测量结果与 Zygo 干涉仪^[16-21]测量结果进行比较分析,结果表明在面形误差分布及误差的峰谷(PV)值和均方根(RMS)值上,两者具有一致性,

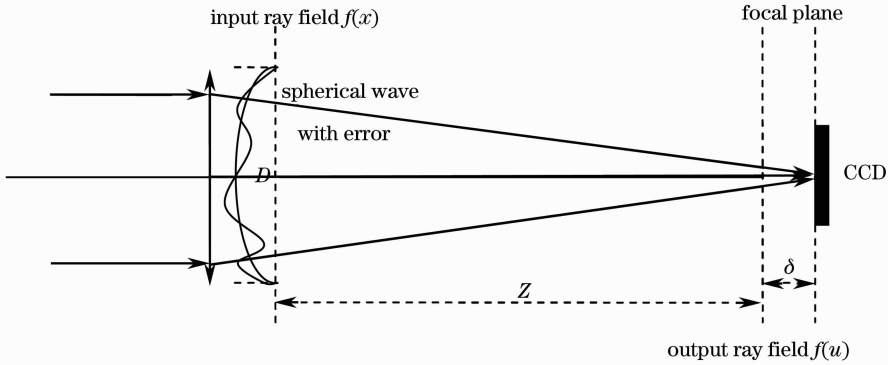


图 1 相位恢复光路原理图

Fig.1 Schematic of optical path of PR

假设一个被测光学系统的通光孔径为 D , 焦距为 Z , 激光光源的中心波长为 λ , 它的光瞳约束函数为 $|f(\mathbf{x})|$, 其中 \mathbf{x} 为一个二维向量, 它的波前畸变为 θ , 则对于焦平面, 它的广义光瞳函数是

$$f(\mathbf{x}) = |f(\mathbf{x})| \exp[i\theta(\mathbf{x})], \quad (1)$$

式中 θ 可以用泽尼克多项式拟合: $\theta(\mathbf{x}) = \sum_n \alpha_n Z_n(\mathbf{x})$. 其中实数 α_n 表示第 n 项多项式系数, Z_n 表示第 n 项泽尼克多项式基底。

对于线性光学系统来说, 广义光瞳 $f(\mathbf{x})$ 在离焦量为 δ 的平面上的脉冲响应函数 $F(\mathbf{u})$ 为

$$F(\mathbf{u}) = |F(\mathbf{u})| \exp[i\psi(\mathbf{u})] = \mathcal{F}\{f(\mathbf{x}) \exp[\epsilon(\mathbf{x}, \delta)]\}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{x} 是光瞳域坐标, \mathbf{u} 是像域坐标, \mathbf{x} 和 \mathbf{u} 都是二维向量, ψ 为脉冲响应的相位部分, \mathcal{F} 为二维傅里叶变换, \mathcal{F}^{-1} 为二维逆傅里叶变换, $\epsilon(\mathbf{x}, \delta)$ 表示在位置 \mathbf{x} 由离焦量 δ 所造成的波前畸变。

对于一个相位恢复系统, (1) 式中的 $|f(\mathbf{x})|$ 是已知的被测光学系统的先验条件, 对应于光瞳的大小与形状; $|F(\mathbf{u})|^2$ 是通过 CCD 采集来的图像; CCD 所在位置的离焦量为 δ . 用相位恢复进行波前

对于波前 RMS 的测量精度达到 $3\lambda/1000$ 左右。这说明了相位恢复测量方法的可行性和准确性, 为后续的实际工程中使用相位恢复波前传感器提供了实验支持。

2 相位恢复波前传感器基本原理

相位恢复系统通过在指定离焦面上采集的图像及其对应的离焦量以及光瞳函数这三个已知条件来反向解算光学系统像差^[22]. 下面通过图 1 的简单光路说明相位恢复系统的基本原理。

探测的目的就是通过以上的已知量来计算得到 α_n . 所以把相位恢复问题形式化描述为: 已知 $|f(\mathbf{x})|$, $\delta_1, |F_1(\mathbf{u})|^2, \delta_2, |F_2(\mathbf{u})|^2, \dots, \delta_M, |F_M(\mathbf{u})|^2$, 求光瞳的波前畸变 θ 所对应的各项泽尼克系数 α_n , 其中 $|f(\mathbf{x})|$ 是光瞳约束函数, 距离焦面 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_M$ 处采集的图像分别为 $|F_1(\mathbf{u})|^2, |F_2(\mathbf{u})|^2, \dots, |F_M(\mathbf{u})|^2$. 相位恢复的目标函数和目标函数关于 α_n 的偏导数分别为

$$B_k = E_{Fk}^2 = N^{-2} \sum_{m=1}^M \sum_{\mathbf{u}} [|G_{m,k}(\mathbf{u})| - |F(\mathbf{u})|]^2, \quad (3)$$

$$\partial_{\alpha_n} B_k = -2 \sum_m \sum_{\mathbf{x}} |f(\mathbf{x})| |g'_{m,k}(\mathbf{x})| \cdot \sin[\theta'_{m,k}(\mathbf{x}) - \theta_{m,k}(\mathbf{x})] Z_n(\mathbf{x}). \quad (4)$$

有了目标函数(3)式及其对各项泽尼克系数的导数(4)式, 便可以用数学最优化的办法求解波前的各项泽尼克系数值, 在这里使用之前相位差异(PD)^[23-28]实验中已经应用的 L-BFGS^[29]算法。求解步骤如下:

1) 选定初始点 $\alpha^0 \in \mathcal{R}^n$ 和初始对称正定矩阵 $\mathbf{H}_0 \in \mathcal{R}^{n \times n}$. 设定搜索精度 $\epsilon > 0$ 和有限记忆次数 m .

计算梯度 $\partial_a B(\alpha^0)$, 并令 $k = 0$ 。

2) 若 $\|\partial_a B(\alpha^k)\| \leq \epsilon$, 则算法终止, 得到最优解 α^k , 即为所求的波前的各项泽尼克系数值。否则, 令 $d^k = -\mathbf{H}_k \partial_a B(\alpha^k)$ 。

3) 采用非精确线性搜索策略, 根据(3)式及(4)式确定步长 c_k , 更新 $\alpha^{k+1} = \alpha^k + c_k d^k$, 并根据(4)式计算梯度值 $\partial_a B(\alpha^{k+1})$ 。

4) 利用初始值 \mathbf{H}_0 或者中间信息构造 $\mathbf{H}_k^{(0)}$, 反复利用(5)式进行 $m+1$ 次修正得到 \mathbf{H}_{k+1} :

$$\mathbf{H}_{k+1} = \left(I - \frac{s_k y_k^T}{s_k^T y_k} \right) \mathbf{H}_k^{(0)} \left(I - \frac{y_k s_k^T}{s_k^T y_k} \right) + \left(\frac{s_k s_k^T}{s_k^T y_k} \right), \quad (5)$$

式中 $s_k = \alpha^{k+1} - \alpha^k$, $y_k = \partial_a B(\alpha^{k+1}) - \partial_a B(\alpha^k)$ 。

5) 令 $k = k+1$, 转步骤 2)。其中, $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_n]'$, α^k 表示第 k 次迭代所得到的 α 的值。在 L-BFGS 算法中, 只需要存储 $m+1$ 个向量组 $\{s_i, y_i\}_{i=k-m}^k$ 就能够计算出下次迭代的 Hessian 矩阵的逆近似。在实际计算中, 通常要根据问题规模大小及机器性能选择合适的 m 值来控制存储量。一般 m 取

值为 3~20。

3 相位恢复波前传感器与干涉仪对比测量的检测实验

3.1 实验原理及结构

相位恢复波前传感器测量的光路结构如图 2 所示。从 Zygo 干涉仪出射的平行光经过透镜 1 和透镜 2(L1, L2)组成的缩束镜组后, 经过分光棱镜, 一部分经过孔径光阑, 再经过偏振片入射到 LC-SLM^[30-31]。由于 LC-SLM 的有效面积只有 $6.14 \text{ mm} \times 6.14 \text{ mm}$, 因此加入光阑限制通光口径; 另外 LC-SLM 要求入射光为线偏振光, 因此加入偏振片使光束透偏方向与 LC-SLM 的快轴方向重合。通过对 LC-SLM 的控制, 使反射的光束带有指定的相位信息(即像差), 经过偏振片及光阑后, 再次由分光棱镜分为两路, 其中一路原路返回 Zygo 干涉仪, 与干涉仪的参考光发生干涉, 形成干涉条纹。通过分析干涉条纹, 可以计算出 LC-SLM 上加载的待测波前。另一部分经过会聚透镜 3(L3)会聚在 CCD 相

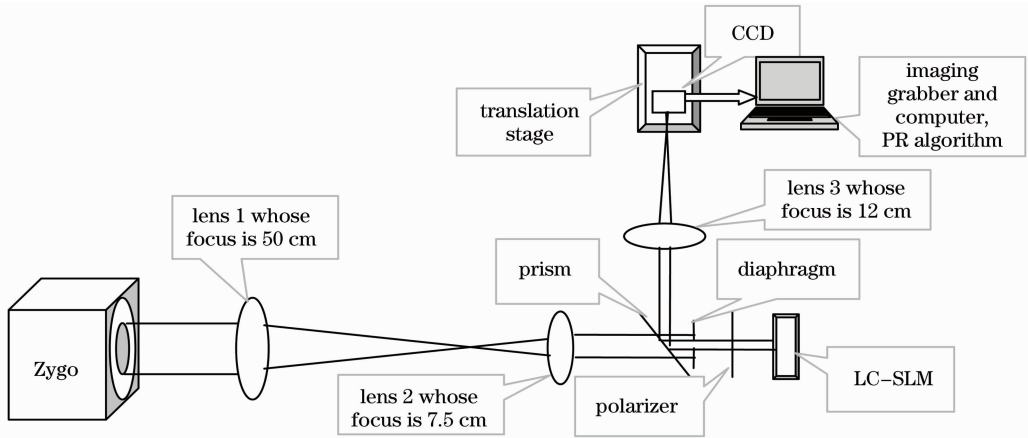


图 2 相位恢复波前传感器原理图

Fig. 2 Schematic diagram of PRWS

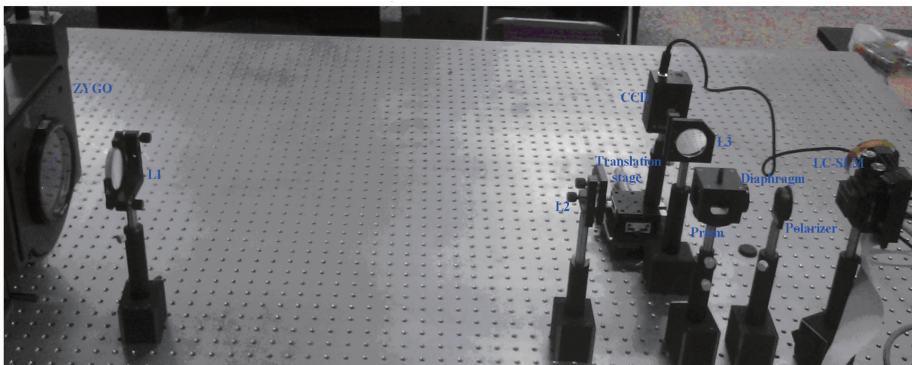


图 3 相位恢复实验光路图

Fig. 3 Experimental system of PR

机上,用于实现基于相位恢复的波前测量。相机被安置在一个可移动平台上,通过使相机沿光轴方向移动和角度姿态微调,得到焦点前后接收不同离焦量的图像,用 PR 算法进行处理,同样得到 LC-SLM 上加载的像差波前。比较两个测量结果。

系统波长为 $\lambda=632.8\text{ nm}$, L3 的焦距为 120 mm , 中心出瞳口径为 5 mm , 焦深约为 0.73 mm 。实验中选取离焦距离分别为 0 和 4.65 mm , 所对应的离焦相位 PV 分别为 0 和 1.6λ 。相机像元尺寸为 $6.45\text{ }\mu\text{m}$, 每一个离焦位置分别截取以目标为中心的 $128\text{ pixel}\times 128\text{ pixel}$ 大小区域, 曝光时间 20 ms , 移动平台的准确度为 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ 。实验系统如图 3 所示。

3.2 实验步骤

1) 搭建实验系统, 启动 LC-SLM, 并令其为展平状态, 即不产生波前畸变状态, 调整光路, 尽量调小光路本身的像差。

2) 调整光阑的大小及位置, 让入射到 LC-SLM 上的光斑尽量内切 LC-SLM 上的有效区域。

3) 旋转偏振片, 使偏振片的透偏方向与 LC-SLM 的快轴方向重合, 起到相位调制的作用。

4) 观察 Zygo 干涉仪显示的干涉条纹, 微调偏振片的透偏方向, 使干涉条纹对比度最大。

5) 调整平移台, 使 CCD 上成的光点像最小, 记录该位置, 并将其作为离焦量为 0 的位置。

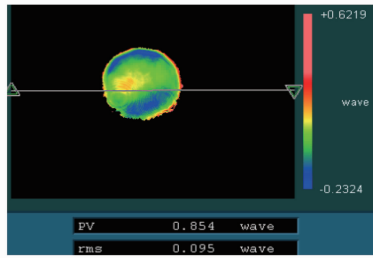
6) 把 LC-SLM 置为展平状态, 用 Zygo 干涉仪测量, 将测得的波前记为 W_0 , 作为后面实验中 Zygo 干涉仪的参考波前。在离焦距离分别为 0 和 4.65 mm 的位置用 CCD 相机采集图像, 用 PRWS 解算出波前 W_1 , 并将其作为后面实验中 PRWS 的参考波前。

7) 把指定的波前畸变输入到 LC-SLM 上。用 Zygo 干涉仪测量此时的波前, 并减去参考波前 W_0 和泽尼克系数的前 4 项, 得到 LC-SLM 加载的畸变波前。

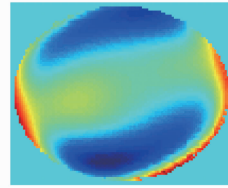
8) 调整 PRWS 光路, 在离焦距离分别为 0 和 4.65 mm 的位置用 CCD 相机采集图像, 作为 PRWS 的输入, 通过相位恢复算法解算出波前, 并减去参考波前 W_1 和泽尼克系数的前 4 项, 得到 PRWS 测量到的 LC-SLM 加载的波前。比较两者的测量结果。

3.3 实验结果及讨论

分别对 LC-SLM 施加单项像差, 进行 Zygo 和 PRWS 的测量对比, 如图 4~12 所示。图中的波前均减去了平移、倾斜及离焦等系统装调引入的误差。



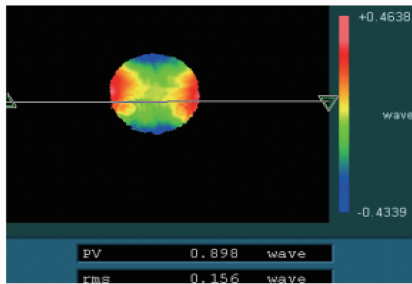
(a) result of Zygo interferometer measurement, $f_{\text{RMS}}=0.095\lambda, f_{\text{PV}}=0.854\lambda$



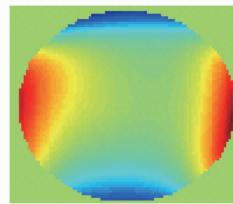
(b) result of PR measurement, $f_{\text{RMS}}=0.047\lambda, f_{\text{PV}}=0.279\lambda$

图 4 LC-SLM 展平时的测量结果对比

Fig. 4 Contrast measurements when LC-SLM unfolds



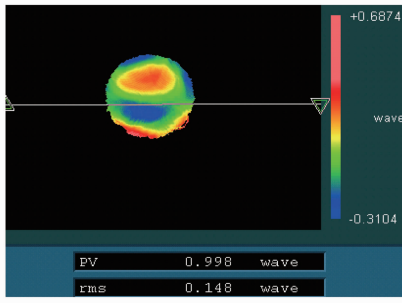
(a) result of Zygo interferometer measurement, $f_{\text{RMS}}=0.156\lambda, f_{\text{PV}}=0.898\lambda$



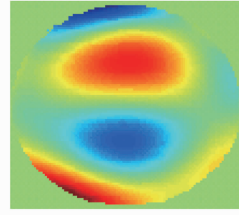
(b) result of PR measurement, $f_{\text{RMS}}=0.153\lambda, f_{\text{PV}}=0.989\lambda$

图 5 LC-SLM 加入 $f_{\text{PV}}=1\lambda$ 像散时测量结果对比

Fig. 5 Contrast measurements when LC-SLM is added with $f_{\text{PV}}=1\lambda$ astigmatism



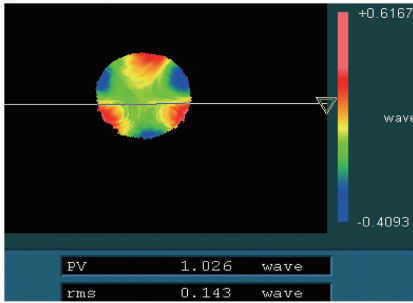
(a) result of Zygo interferometer measurement, $f_{RMS}=0.148\lambda, f_{PV}=0.998\lambda$



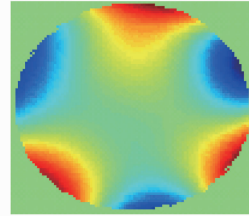
(b) result of PR measurement, $f_{RMS}=0.151\lambda, f_{PV}=0.888\lambda$

图 6 LC-SLM 加入 $f_{PV}=1\lambda$ 彗差时测量结果对比

Fig. 6 Contrast measurements when LC-SLM is added with $f_{PV}=1\lambda$ coma



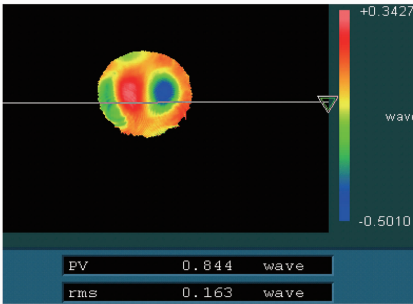
(a) result of Zygo interferometer measurement, $f_{RMS}=0.143\lambda, f_{PV}=1.026\lambda$



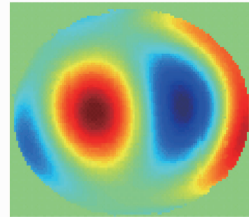
(b) result of PR measurement, $f_{RMS}=0.145\lambda, f_{PV}=0.878\lambda$

图 7 LC-SLM 加入 $f_{PV}=1\lambda$ 三叶草像差测量结果对比

Fig. 7 Contrast measurements when LC-SLM is added with $f_{PV}=1\lambda$ trefoil aberration



(a) result of Zygo interferometer measurement, $f_{RMS}=0.163\lambda, f_{PV}=0.844\lambda$



(b) result of PR measurement, $f_{RMS}=0.163\lambda, f_{PV}=0.756\lambda$

图 8 LC-SLM 加入 $f_{PV}=1\lambda$ 三阶彗差测量结果对比

Fig. 8 Contrast measurements when LC-SLM is added with $f_{PV}=1\lambda$ tertiary coma

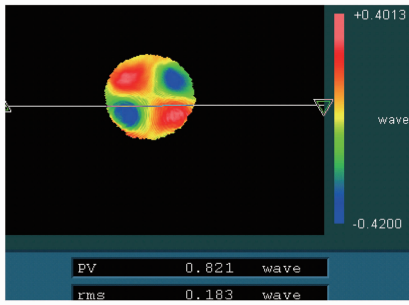
表 1 给出了相位恢复与 Zygo 干涉仪对不同像差测量结果的波前 RMS 值对比。对于泽尼克的单项像差,得到了测量结果,在这里只列举了一些像差对比结果。综上所述,在面形误差分布及误差的

PV 值和 RMS 值上,两种测量方法具有一致性,对于波前 RMS 值的测量精度达到 $3\lambda/1000$,这说明相位恢复测量方法的可行性和准确性。

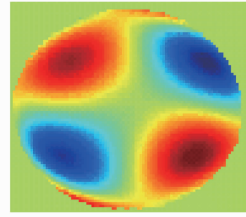
表 1 相位恢复与 Zygo 干涉仪关于不同像差测量结果的 RMS 对比

Table 1 PRWS and Zygo interferometer on the RMS contrast of the different aberration measurements

| | Astigmatism | Coma | Trefoil | Tertiary coma | Secondary astigmatism | Tetrafoil | Secondary spherical | Secondary tetrafoil |
|------------------|-------------|-------|---------|---------------|-----------------------|-----------|---------------------|---------------------|
| PR / λ | 0.153 | 0.151 | 0.145 | 0.163 | 0.186 | 0.096 | 0.197 | 0.161 |
| Zygo / λ | 0.156 | 0.148 | 0.143 | 0.163 | 0.183 | 0.097 | 0.199 | 0.162 |



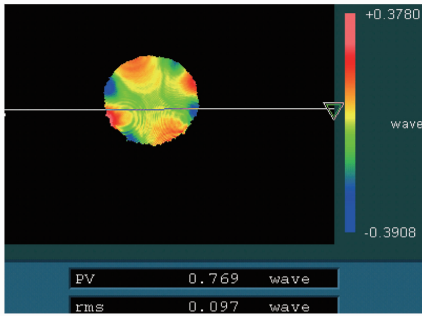
(a) result of Zygo interferometer measurement, $f_{RMS}=0.183\lambda, f_{PV}=0.821\lambda$



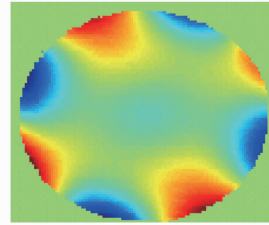
(b) result of PR measurement, $f_{RMS}=0.186\lambda, f_{PV}=0.757\lambda$

图 9 LC-SLM 加入二阶像散测量结果对比

Fig. 9 Contrast measurements when LC-SLM is added with secondary astigmatism



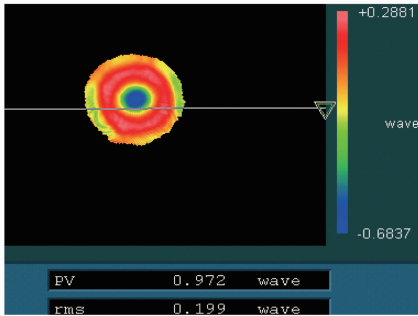
(a) result of Zygo interferometer measurement, $f_{RMS}=0.097\lambda, f_{PV}=0.769\lambda$



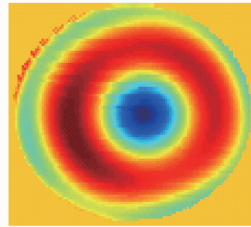
(b) result of PR measurement, $f_{RMS}=0.096\lambda, f_{PV}=0.633\lambda$

图 10 LC-SLM 加入 $f_{PV}=1\lambda$ 四叶草像差测量结果对比

Fig. 10 Contrast measurements when LC-SLM is added with tetrafoil aberration



(a) result of Zygo interferometer measurement, $f_{RMS}=0.199\lambda, f_{PV}=0.972\lambda$



(a) result of PR measurement, $f_{RMS}=0.197\lambda, f_{PV}=0.943\lambda$

图 11 LC-SLM 加入二阶球差测量结果对比

Fig. 11 Contrast measurements when LC-SLM is added with secondary spherical aberration

为了从另一个角度说明 PRWS 的准确性,对 LC-SLM 施加如图 12 的二阶四叶草像差,用 CCD 采集离焦距离分别为 $-4.5, -3, 0, 3, 4.5$ mm 位置的图像,如图 13 所示。用图 12(b)所示 PRWS 测得的波前计算得到上面六个位置的点扩展函数如图 14 所示。

从图 13 和图 14 可以看出,采集来的图像和计算得到的图像具有相似性。

由以上实验结果可以看出,PRWS 可以满足实

际工程的需要,并且 PRWS 具有 Zygo 干涉仪所不具备的优点^[32-36]:

- 1) 平台的震动对 PRWS 影响小,甚至可以忽略;
- 2) PRWS 结构简单,甚至可以在对光路不进行任何改变的前提下,利用成像系统上已有的相机对整个光学系统进行在位检测;
- 3) PRWS 的 CCD 用较少的采样点就可以得到较好的测量精度^[35-36],如图 13 所示,虽然截取的图

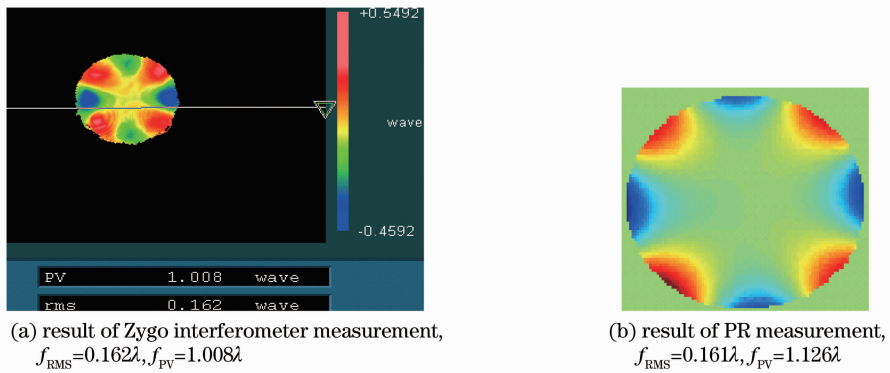


图 12 LC-SLM 加入二阶四叶草像差测量结果对比

Fig. 12 Contrast measurements when LC-SLM is added with secondary tetrafoil aberration



图 13 采集来的图像

Fig. 13 Acquired images



图 14 计算得到的图像

Fig. 14 Calculated images

像是 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 的,但是实际有用的像素区域只在 $40 \text{ pixel} \times 40 \text{ pixel}$ 以内;如图 2 所示,如果不加入 L1 和 L2 对光束进行扩束,而是直接用干涉仪测量 LC-SLM 的 $6.14 \text{ mm} \times 6.14 \text{ mm}$ 的有效区域,就会由于干涉仪上的波前采样不足,而测不出波前,这也是在实验前期构造光路时所发现的。

4 结 论

本文搭建了 PRWS 和 Zygo 干涉仪对不同波前畸变进行比较测量的实验平台,定量分析了 PRWS 的波前测量精度,在面形误差分布及误差的峰谷值和均方根值上,两者具有一致性,对于波前 RMS 的测量精度达到 $3\lambda/1000$ 左右,并在实验过程中充分体现了 PRWS 相比 Zygo 干涉仪的抗震动、光路简单、用较小的相机采样点就可以精确解算出波前的优点,这说明相位恢复测量方法的可行性和准确性,为接下来要进行的大镜面在位检测研究提供了实验支持。

参 考 文 献

1 G R Brady, J R Fienup. Improved optical metrology using phase retrieval [C]. Optical Fabrication & Testing, 2004. OTuB3.

2 Yang Huizhen, Gong Chenglong. Phase retrieval for a kind of wavefront sensor based on pupil phase diversity [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1112002.
 杨慧珍, 龚成龙. 一种基于瞳面相位差的波前传感器相位恢复 [J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1112002.
 3 W Osten. Some answers to new challenges in optical metrology [C]. SPIE, 2008, 7155: 715503.
 4 C M Ohara, J A Faust, A E Lowman, et al.. Phase retrieval camera optical testing of the advanced mirror system demonstrator [C]. SPIE, 2004, 5487: 1744-1756.
 5 R W Gerchberg, W O Saxton. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction phase pictures [J]. Optik, 1972, 35(2): 237-246.
 6 J R Fienup. Phase retrieval algorithms; a comparison [J]. Appl Opt, 1982, 21(15): 2758-2769.
 7 J R Fienup, J C Marron, T J Schulz, et al.. Hubble Space Telescope characterized by using phase-retrieval algorithms [J]. Appl Opt, 1993, 32(10): 1747-1767.
 8 B H Dean, D L Aronstein, S J Scott, et al.. Phase retrieval algorithm for JWST flight and testbed telescope [C]. SPIE, 2006, 6265: 626511.
 9 Li Fei, Rao Changhui. Study on phase diversity wavefront sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0804001.
 李 斐, 饶长辉. 高精度相位差波前探测器的数值仿真和实验研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0804001.
 10 Liang Shitong, Yang Jianfeng, Xue Bin. A new phase diversity wave-front error sensing method based on genetic algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1015-1019.
 梁士通, 杨建峰, 薛 彬. 基于遗传算法的改进相位差法波前误差传感技术研究 [J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1015-1019.
 11 Jiang Pengzhi, Ma Haotong, Zou Yongchao, et al.. Study of aberration correction in light path of adaptive optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1214002.
 蒋鹏志, 马浩统, 邹永超, 等. 自适应光学系统内光路的像差校正研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1214002.
 12 A J Devaney, R Childlaw. On the uniqueness question in the problem of phase retrieval from intensity measurement [J]. J Opt Soc Am, 1978, 68(10): 1352-1354.
 13 Han Bing, Xiao Wen, Pan Feng, et al.. Optimization of space sampling distance of phase retrieval algorithm for in-line digital holography [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(12): 120903.
 韩 冰, 肖 文, 潘 锋, 等. 同轴数字全息相位恢复算法采样距离优化研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(12): 120903.
 14 Fu Fuxing, Zhang Bin. Recovery of high frequency phase of laser beam with wavefront distortion [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0402009.

- 付福兴, 张 彬. 激光束畸变波前高频相位的恢复[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0402009.
- 15 G R Brady, J R Fienup. Phase retrieval as an optical metrology tool [C]. Optical Fabrication & Testing, 2005. TD03.
- 16 J E Millerd, J C Wyant. Simultaneous Phase-Shifting Fizeau Interferometer [P]. US Patent; 7057738B2, [2006-06-06].
- 17 L Deck. Vibration-resistant phase-shifting interferometry [J]. Appl Opt, 1996, 35(34): 6655-6662.
- 18 J H Burge, J C Wyant. Applications of computer-generated holograms for interferometric measurement of large aspheric optics [C]. SPIE, 1995, 2576: 258-269.
- 19 S Reichelt, C Pruss, H J Tiziani. Absolute interferometric test of aspheres by use of twin computer-generated holograms [J]. Appl Opt, 2003, 42(22): 4468-4479.
- 20 G E Sommargren, D W Phillion, E W Campbell. Sub-nanometer interferometry for aspheric mirror fabrication [C]. The 9th International Conference on Production Engineering, 1999. 1-7.
- 21 S Reichelt, H J Tiziani. Twin-CGHs for absolute calibration in wavefront testing interferometry [J]. Opt Commun, 2003, 220(1): 23-32.
- 22 Ma Xinxue, Wang Jianli, Wang Bin. Study on phase retrieval algorithm [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(2): 217-221.
马鑫雪, 王建立, 王 斌. 相位恢复算法的探究 [J]. 激光与红外, 2012, 42(2): 217-221.
- 23 Wang Bin, Wang Zongyang, Wu Yuanhao, *et al.*. Calibration of no-common path aberration in AO system using multi-channel phase-diversity wave-front sensing [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(7): 1683-1692.
王 斌, 汪宗洋, 吴元昊, 等. 利用多通道相位差异波前探测法检测自适应光学系统非共光路像差[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(7): 1683-1692.
- 24 Wang Jianli, Wang Zongyang, Wang Bin, *et al.*. Image restoration by phase-diverse speckle [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 1165-1170.
王建立, 汪宗洋, 王 斌, 等. 相位差异散斑法图像复原技术 [J]. 光学 精密工程, 2011, 19(5): 1165-1170.
- 25 Zhao Jinyu, Chen Zhanfang, Wang Bin, *et al.*. Parallelity improvement of object function for phase diversity [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 431-438.
赵金宇, 陈占芳, 王 斌, 等. 相位差异法目标函数并行化改造 [J]. 光学 精密工程, 2012, 20(2): 431-438.
- 26 Wang Bin, Wang Zongyang, Wang Jianli, *et al.*. Phase-diverse speckle imaging with two cameras [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(6): 1384-1390.
- 王 斌, 汪宗洋, 王建立, 等. 双相机相位差异散斑成像技术 [J]. 光学 精密工程, 2011, 19(6): 1384-1390.
- 27 Wang Zongyang, Wang Bin, Wu Yuanhao, *et al.*. Calibration of non-common path static aberrations by using phase diversity technology [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0701007.
汪宗洋, 王 斌, 吴元昊, 等. 利用相位差异技术校准非共光路静态像差 [J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0701007.
- 28 Zhao Jinyu, Wu Yuanhao, Ma Xinxue, *et al.*. Image restoration based on real time wave-front information [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(6): 1350-1356.
赵金宇, 吴元昊, 马鑫雪, 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.
- 29 R H Byrd, P Lu, J Nocedal. A limited-memory algorithm for bound-constrained optimization [J]. SIAM J Scientific and Statistical Computing, 1995, 16(5): 1190-1208.
- 30 R J Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. J Opt Soc Am, 1976, 66(3): 207-211.
- 31 N Roddier. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials [J]. Opt Eng, 1995, 29(10): 1174-1180.
- 32 B L Ellerbroek, B J Thelen, D J Lee, *et al.*. Experimental comparison of Shack-Hartmann wavefront sensing and phase-diverse phase retrieval [C]. SPIE, 3126: 307-320.
- 33 Rao Xuejun, Ling Ning, Wang Cheng, *et al.*. Application of Hartmann-Shack sensor in aspheric process [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(4): 491-494.
饶学军, 凌 宁, 王 成, 等. 哈特曼夏克传感器在非球面加工中的应用 [J]. 光学学报, 2002, 22(4): 491-494.
- 34 Li Min, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Experimental comparison between linear phase retrieval sensor and Hartmann wavefront sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(4): 619-625.
李 敏, 李新阳, 姜文汉. 线性相位反演传感器与哈特曼传感器的实验研究对比 [J]. 光学学报, 2008, 28(4): 619-625.
- 35 Wu Yulie, Hu Xiaojun, Dai Yifan, *et al.*. Research on *in-situ* surface measurement for large aperture optical mirror based on phase retrieval technology [J]. Chinese J Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 157-163.
吴宇列, 胡晓军, 戴一帆, 等. 基于相位恢复技术的大型光学镜面面形在位检测技术 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 157-163.
- 36 Li Shengyi, Hu Xiaojun, Wu Yulie. Phase retrieval on site testing for large mirrors [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(2): 365-370.
李圣怡, 胡晓军, 吴宇列. 大镜面在位检测中的相位恢复技术研究 [J]. 光子学报, 2009, 38(2): 365-370.

栏目编辑: 何卓铭