

## 哈特曼-夏克波前传感器高精度球面波标定方法研究

包明帝 史国华 邢利娜 何益

### High-precision spherical wavefront calibration method for shack-hartmann wavefront sensor

BAO Ming-di, SHI Guo-hua, XING Li-na, HE Yi

引用本文:

包明帝, 史国华, 邢利娜, 何益. 哈特曼-夏克波前传感器高精度球面波标定方法研究[J]. *中国光学*, 2024, 17(3): 521-527. doi: 10.37188/CO.2023-0148

BAO Ming-di, SHI Guo-hua, XING Li-na, HE Yi. High-precision spherical wavefront calibration method for shack-hartmann wavefront sensor[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(3): 521-527. doi: 10.37188/CO.2023-0148

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0148>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 微透镜阵列衍射效应对夏克-哈特曼波前探测器的影响分析

Analysis of influence of diffraction effect of microlens array on Shack-Hartmann wavefront sensor

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(1): 94 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0176>

#### 高精度硅基集成光学温度传感器研究

High-precision silicon-based integrated optical temperature sensor

*中国光学 (中英文)*. 2021, 14(6): 1355 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0054>

#### 高波前拟合精度的紧凑型音圈变形镜

Compact voice coil deformable mirror with high wavefront fitting precision

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(6): 1463 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0001>

#### 基于多激光传感器装配的自由曲面法线找正方法研究

The normal alignment method for freeform surfaces based on multiple laser sensor assembly

*中国光学 (中英文)*. 2021, 14(2): 344 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0205>

#### 光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器研究进展

Research progress of optical fiber Fabry-Perot interferometer high temperature sensors

*中国光学 (中英文)*. 2022, 15(4): 609 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0219>

#### 惯性传感器地面弱力测量系统热设计

Thermal design of ground weak force measurement system for inertial sensors

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(6): 1404 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0022>

文章编号 2097-1842(2024)03-0521-07

## 哈特曼-夏克波前传感器高精度 球面波标定方法研究

包明帝<sup>1</sup>, 史国华<sup>1,2\*</sup>, 邢利娜<sup>1,2</sup>, 何益<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国科学技术大学生物医学工程学院(苏州), 江苏苏州 215163;

2. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏苏州 215163)

**摘要:**为解决哈特曼-夏克波前传感器传统标定方法存在的测量精度低、稳定性不足等问题,提出了一种基于球面波的哈特曼-夏克波前传感器高精度绝对标定方法。通过理论推导获取了球面波的高精度标定方法,结合搭建的球面波标定实验装置,对子孔径数为 $128 \times 128$ 的哈特曼-夏克波前传感器完成高精度标定。该方法计算得到了哈特曼-夏克波前传感器结构参数 $f$ ,  $w$ 以及 $L_0$ 的精确值。对标定后的哈特曼-夏克波前传感器的测量精度进行测试,实验结果表明,经本文方法标定后的哈特曼-夏克波前传感器的波前复原精度达到了 $PV=1.376 \times 10^{-2}\lambda$ ,  $RMS=4 \times 10^{-3}\lambda$  ( $\lambda=625$  nm), 重复性精度为 $PV=3.2 \times 10^{-3}\lambda$ ,  $RMS=9.76 \times 10^{-4}\lambda$  ( $\lambda=625$  nm)。该方法可以为大口径的 SHWFS 完成高精度标定,提升测量精度。

**关键词:**哈特曼-夏克波前传感器;绝对标定;球面波前

中图分类号: TP741

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2023-0148

## High-precision spherical wavefront calibration method for shack-hartmann wavefront sensor

BAO Ming-di<sup>1</sup>, SHI Guo-hua<sup>1,2\*</sup>, XING Li-na<sup>1,2</sup>, HE Yi<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Biomedical Engineering (Suzhou), University of Science and  
Technology of China, Suzhou 215163, China;

2. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology,  
Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China)

\* Corresponding author, E-mail: shigh@sibet.ac.cn; heyi@sibet.ac.cn

**Abstract:** To address the issues of low measurement accuracy and insufficient stability in traditional calibration methods for Shack-Hartmann wavefront sensors (SHWFS), we propose a high-precision absolute calibration method using spherical waves generated by sensor. A high-precision calibration method for spherical

收稿日期: 2023-08-28; 修订日期: 2023-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 62075235); 国家重点研发计划项目(No. 2021YFF0700700); 中国科学院青年创新促进会(No. 2019320); 中国科学院战略性先导科技专项(No. XDA16021304)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62075235); The National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFF0700700); Youth Innovation Promotion Association (No. 2019320); The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA16021304)

waves was obtained through theoretical derivation. Combined with the constructed spherical wave calibration experimental device, high-precision calibration was performed on the SHWFS with sub apertures of  $128 \times 128$ . The structural parameters of the SHWFS ( $f$ ,  $w$ , and  $L_0$ ) are calculated precisely. The measurement accuracy of the SHWFS is verified after calibration. The experimental results demonstrate that by using this method to calibrate the SHWFS, its wavefront recovery accuracy reaches a PV of  $1.376 \times 10^{-2} \lambda$  and an RMS of  $4 \times 10^{-3} \lambda$  (where  $\lambda = 625$  nm), respectively. Additionally, its repeatability accuracy reaches a PV of  $3.2 \times 10^{-3} \lambda$  and an RMS of  $9.76 \times 10^{-4} \lambda$  (where  $\lambda = 625$  nm), respectively. These findings suggest that this method is suitable for enhancing the measurement accuracy of high-precision calibration of SHWFS with large aperture.

**Key words:** Shack-Hartmann wavefront sensor; absolute calibration; spherical wavefront

## 1 引言

波前测量技术是光学精密测量技术的重要组成部分,一直与光学及光电子学同步发展,其融合了光学、信息学、微电子学、机械等学科<sup>[1]</sup>。其中,基于斜率测量原理的哈特曼-夏克波前传感器(Shack-Hartmann Wavefront Sensor, SHWFS)由于具有光能利用率高、结构简单、成本低、测量环境需求简单、抗干扰能力强等优点,被广泛应用于自适应光学<sup>[2]</sup>、激光光束检测<sup>[3]</sup>、光学元件检测<sup>[4]</sup>和眼科医疗<sup>[5-6]</sup>等领域。

SHWFS 作为一种相对测量仪器,由微透镜阵列和设置在微透镜阵列焦平面的探测器组成。在测量之前,必须利用理想光源进行标定,其测量结果是被测波前相对于标定参考波前的偏差。高精度的标定技术对高精度 SHWFS 的研制具有重大意义,其标定精度直接影响着传感器波前复原的精度。高精度标定的目的主要包括两个方面:一方面,通过标定消除哈特曼-夏克传感器中各个元件的加工误差和装配误差等系统误差;另一方面,通过高精度标定,确定 SHWFS 中各个元件的物理参数(如透镜阵列的焦距,子透镜的中心间距,光电探测器的像素尺寸),从而确定波前复原的比例系数。

一直以来,SHWFS 常采用平面波法标定,王艳萍等人利用已知斜率的平面波来标定 SHWFS,计算出微透镜阵列面与探测器面之间的距离值,并用于实际测量,波前测量精度 RMS 值达  $\lambda/35$ , PV 值达  $\lambda/7$ <sup>[7]</sup>。然而,该方法无法消除平面波本

身的误差,此外,大口径的平面波很难获得且造价昂贵。为解决传统标定方法存在的上述问题,国内外学者针对 SHWFS 的高精度球面波标定开展了一系列的研究工作<sup>[8-16]</sup>。其中,Alexander Chernyshov 等人利用球面波前绝对标定 SHWFS,标定后的 SHWFS 在复原球面波前的残差的 PV 值达到了  $\lambda/100$ <sup>[10]</sup>,该方法引入有限项代替无限项、二项式拟合等多项近似且对影响探测器精度的主参数进行了近似处理;杨金生等人针对文献<sup>[10]</sup>存在的不足,对球面波绝对标定方法及计算方法进行了改进,提出了一种新的 SHWFS 的绝对校准方法<sup>[13]</sup>,但该方法仍然存在有限项代替无限项、二项式拟合等近似。综上所述,上述研究成果均采用球面波的方式进行标定,不同的标定方法得到了不同的测量精度,但上述方式均采取了有限项代替无限项、二项式拟合等众多的近似,且标定用的球面波精度不高,引入的误差源较多,使得标定后的 SHWFS 测量精度不高,测量稳定性不足。

本文提出了一种基于球面波的哈特曼-夏克波前传感器高精度绝对标定方法,并搭建了高精度标定的实验装置。使用该方法对子孔径数为  $128 \times 128$  的 SHWFS 进行标定,并对标定后 SHWFS 的测量精度进行了测试,并取得了较理想结果。

## 2 方法

### 2.1 哈特曼-夏克波前传感器工作原理

哈特曼-夏克波前传感器主要由二维微透镜

阵列和位于微透镜阵列焦平面上的光电探测器组成<sup>[16]</sup>。目前,可以用于光电探测的主流器件有两类:电荷耦合器件(CCD)和互补金属氧化物半导体(CMOS),其中 CCD 探测器最为常用<sup>[17]</sup>。

SHWFS 的原理图如图 1 所示。其工作原理如下:畸变波前入射到微透镜阵列上,被分割成一个个的子波面,在位于微透镜阵列焦平面的光电探测器上形成一个二维的光斑阵列;利用质心算法,计算出各个光斑的质心位置;再通过测量畸变波前的光斑质心位置与参考波前的光斑质心位置的偏差,进而求出各个子波面的平均斜率;最后根据波前重构算法复原出畸变波前。

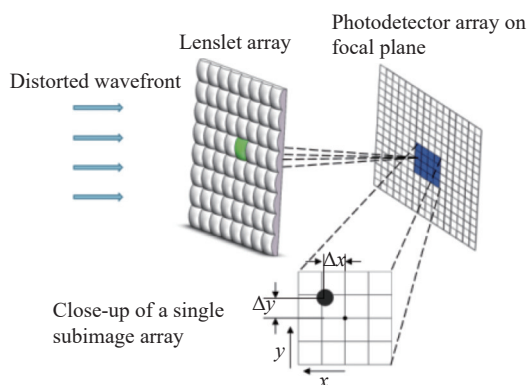


图 1 哈特曼-夏克波前传感器原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of SHWFS

## 2.2 球面波绝对标定方法原理

在光场中,由点光源产生的球面波的波前相位  $\Phi(X, Y)$  可以表示为:

$$\Phi(X, Y) = \frac{1}{2R} [(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2] \quad (1)$$

其中,  $(X_0, Y_0)$  为点光源的初始位置,  $R$  表示球面波的曲率半径。

由于球面波在  $X, Y$  方向均是圆对称分布,故可以选择  $X$  方向进行理论推导。假设各个子孔径内光斑质心相对于光轴的偏移量为  $\sigma(X)$ , 根据球面波前在 SHWFS 探测器上形成的光斑阵列与物理参数的关系(如图 2 所示), 可知:

$$\sigma(X) = f \frac{\partial \Phi(X, Y)}{\partial X} = \frac{f}{R} (X - X_0) \quad (2)$$

式中,  $f$  为微透镜阵列的焦距, 通常为微透镜阵列到 CCD 探测器的距离。

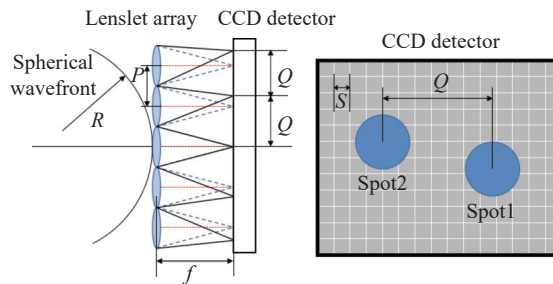


图 2 球面波前在 SHWFS 探测器上形成的光斑图  
Fig. 2 Spots pattern of a spherical wavefront on the plane of the SHWFS detector

相邻子孔径内的光斑间距  $Q$  为:

$$Q = [iP + \sigma(X_{i,j})] - [(i-1)P + \sigma(X_{i-1,j})] = P + \frac{fP}{R} \quad (3)$$

式中,  $P$  表示微透镜阵列中相邻子透镜的中心间距, 相邻子孔径光斑间的距离  $Q$  是利用光电探测器的像素尺寸大小  $S$  和像素个数  $N$  来描述的:

$$Q = NS = \frac{fP}{R} + P \quad (4)$$

高精度球面波标定装置原理图如图 3 所示。其中  $L_0$  为微透镜阵列表面与参考点间的距离,  $L_i$  为点光源与参考点间的距离, 参考点可选择在 CCD 探测器上的某一位置, 由此可得:

$$R = L_i - L_0 \quad (5)$$

因此, 在不同的位置  $L_i (i = 1, 2, 3, \dots, K)$  处, 记录得到对应的光斑间距  $N_i (i = 1, 2, 3, \dots, K)$ , 再结合式(4)、式(5)可知,  $N_i (i = 1, 2, 3, \dots, K)$  均应满足下式:

$$N_i = \frac{fP/(L_i - L_0) + P}{S} \quad (6)$$

上式建立了微透镜阵列参数、光电探测器参数与点光源位置参数的关系。因此系统的绝对标定过程即可转变为微透镜阵列与 CCD 探测器的间距  $f$ , 子透镜的中心间距  $P$ , 像素大小  $S$ , 光纤头初始位置  $L_0$  的求解问题, 进而转变为如下最小二乘问题:

$$\operatorname{argmin}_{f, P, L_0, S} \sum_{i=1}^K \left| N_i - \frac{fP/(L_i - L_0) + P}{S} \right|^2 \quad (7)$$

由于式(6)中,  $N_i$  与其它参数不是线性关系, 无法直接进行最小二乘拟合。为解决该问题, 利



用子透镜的中心间距  $P$  与探测器像素尺寸  $S$  的紧耦合关系

$$w = \frac{P}{S}, \quad (8)$$

将关系式(7)变为

$$\operatorname{argmin}_{f, L_0, w} \sum_{i=1}^K |N_i - f \cdot w / (L_i - L_0) - w|^2. \quad (9)$$

将式(9)分解为 2 个步骤进行迭代:

$$\operatorname{argmin}_{f, L_0} \sum_{i=1}^K |N_i - f \cdot w / (L_i - L_0) - w|^2, \quad (10)$$

$$\operatorname{argmin}_w \sum_{i=1}^K |N_i - f \cdot w / (L_i - L_0) - w|^2. \quad (11)$$

根据以上推导过程,通过微透镜阵列、探测器的标称值  $P$ 、 $S$  值,固定初始值  $w$ ,利用式(9)求解  $f$  和  $L_0$ ;接着,将求解出的  $f$  和  $L_0$  值带入式(10),求解  $w$ ;最后,将求得的  $f$ 、 $w$  以及  $L_0$  的值带入波前复原程序,完成高精度球面波标定。

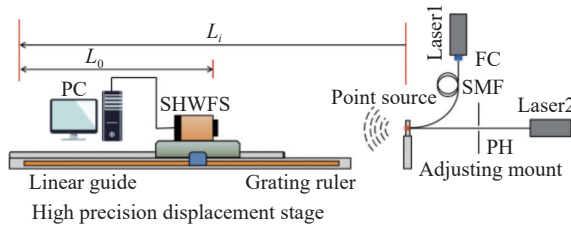


图 3 高精度球面波标定装置原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the high-precision spherical wavefront calibration device

### 3 实验

如图 3 所示,激光器 1 发射端通过光纤耦合器与单模光纤相连,单模光纤输出为点光源,并固定在光纤精密调整架上,其中激光器 1 采用光束质量良好且稳定的 He-Ne 激光器,其输出波长  $\lambda=625 \text{ nm}$ ,单模光纤芯径为  $9 \mu\text{m}$ 。将光纤精密调整架固定在沿着直线导轨滑动的高精度位移台上,高精度位移台固定在光学平台上,其定位精度为  $1 \mu\text{m}$ 。高精度位移台的直线导轨侧面粘贴有光栅尺,并且在高精度位移台上固定有光栅读数头,高精度位移台的移动灵敏度为  $200 \text{ nm}$ 。待标定的 SHWFS 固定在光学平台上,激光器 2 以及

小孔屏用于实现整个实验系统的光学对准工作。为屏蔽杂散光以及降低空气扰动的影响,在整个系统外围设有壳体,在标定过程中,盖有屏蔽帘,以避免环境杂散光引起质心探测误差。

根据衍射理论,激光器耦合单模光纤形成的球面波前误差  $\Delta\Phi$  满足如下关系式<sup>[18]</sup>:

$$\Delta\Phi < \frac{Dd_0}{8R_0} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \Delta\Phi_0, \quad (12)$$

其中,  $D$  是 SHWFS 的通光口径,  $d_0$  是单模光纤芯径,  $R_0$  是经过单模光纤产生的球面波前的曲率半径,  $\lambda$  是入射光波长,  $\Delta\Phi_0$  是原始波前误差。本实验中,原始波前误差  $\Delta\Phi_0$  约  $0.1\lambda$ 。单模光纤芯径  $d_0=9 \mu\text{m}$ ,球面波前的曲率半径不小于  $1.05 \text{ m}$ ,  $D=12.8 \text{ mm}$ ,经计算可知,球面波的波前误差  $\Delta\Phi=1.38 \times 10^{-2}\lambda$ ,对应的  $\text{RMS}=2.3 \times 10^{-3}\lambda$ ,激光器耦合单模光纤产生的高精度球面波可作为高精度的参考波前。

实验中,工作环境温度保持在  $(25 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  内,且  $24 \text{ h}$  内变化量不大于  $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,工作环境相对湿度不大于  $80\% \text{ RH}$ 。此外,还必须避免环境杂光进入哈特曼-夏克波前传感器,以及气流扰动导致传感器波前复原光斑出现抖动。因此,实验装置被安置于一个密封的箱体,实验中箱体被黑布覆盖,可以有效避免环境杂光、隔绝环境的气流扰动。本文中,待标定的 SHWFS 的微透镜阵列和 CCD 探测器的具体物理参数如表 1 所示。

表 1 待标定的 SHWFS 的物理参数

Tab. 1 Parameters of the SHWFS to be calibrated

CCD相机	参数	微透镜阵列	参数
生产商	HIKROBOT	子孔径大小	$0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$
型号	MV-CH250-90TM-M58S-NF	使用子孔径数	$128 \times 128$
像素个数	$5120 \times 5120$	焦距	$2.4 \text{ mm}$
像素尺寸	$2.5 \mu\text{m} \times 2.5 \mu\text{m}$	通光口径	$\Phi 12.8 \text{ mm}$

本文所涉及的标定方法的具体流程如下:

第一步:利用激光器 2、小孔屏、调整架以及高精度位移平台,完成实验装置中光学系统的对准工作。

第二步:利用激光器 1 耦合单模光纤产生高精度球面波。

第三步: 利用高精度位移平台将光纤精密调整架移动至不同位置, 形成不同曲率的高精度球面波。

第四步: 根据高精度球面波形成的光斑阵列, 利用本文标定算法获得待标定的 SHWFS 的相关物理参数, 将它们带入波前复原算法中, 完成对待标定的 SHWFS 的绝对标定。

根据上述实验装置原理图, 搭建实物装置, 如图 4 所示。

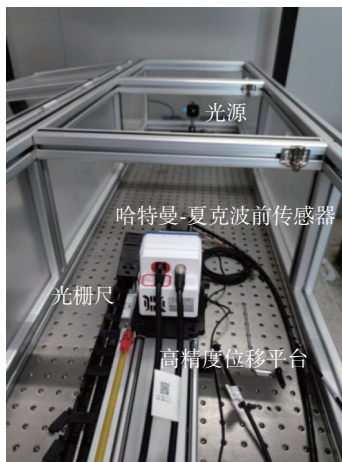


图 4 高精度球面波标定实物装置

Fig. 4 Setup of the high-precision spherical wavefront calibration

## 4 结果分析

### 4.1 标定实验

利用本文提出的高精度球面波标定方法及装置对 SHWFS 进行标定, 为减小模型的非线性及测量噪声的影响, 标定实验在 13 个不同位置进行图像采样, 共进行 10 组标定。同时为了消除外界扰动带来的误差, 每组信号图像采集了 30 帧, 将 30 帧图像的平均值作为原始图像计算各个子孔径的质心位置, 可得微透镜阵列的焦距  $f$ , 初始点光源位置与参考点之间的距离  $L_0$  以及  $w$  值, 如表 2 所示。

由表 2 可得各个参数的均值如下:  $f=2.402$  mm,  $w=39.960$ ,  $L_0=1050.00$  mm, 各参数测量结果稳定可靠。标定过程中将计算所得的各参数均值作为真实值带入到波前复原程序, 进行波前重构, 验证波前测量精度。

表 2 待标定的 SHWFS 的参数测量值

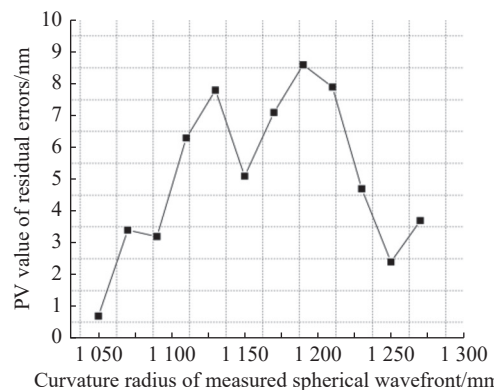
Tab. 2 Measured parameter values of the SHWFS to be calibrated

实验结果参数	$f/\text{mm}$	$w = \frac{P}{S}$	$L_0/\text{mm}$
1	2.402	39.960	1050.00
2	2.402	39.960	1050.00
3	2.402	39.960	1050.00
4	2.403	39.959	1050.00
5	2.402	39.960	1050.00
6	2.402	39.960	1050.00
7	2.403	39.959	1050.00
8	2.402	39.960	1050.00
9	2.401	39.961	1050.00
10	2.402	39.960	1050.00
均值	2.402	39.960	1050.00

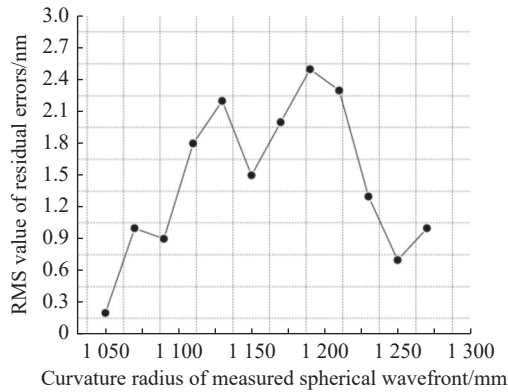
### 4.2 波前测量精度测试

为消除 SHWFS 的系统固有误差, 测试中, 选取其中某一位置的球面波前所形成的光斑阵列图像作为系统的参考图像, 对上述标定的 SHWFS 的测量精度进行测试。利用光栅尺产生精确的球面波, 在不同曲率半径上(采集 12 个位置的数据), 采集 100 帧图像取平均值, 使用 35 阶 Zernike 模式法进行波前复原, 复原波前与理论波前残差的均方根值即为测量精度。不同曲率半径的球面波前复原误差情况、PV 值以及 RMS 值, 如图 5 所示(单位 nm)。

经该方法标定之后, SHWFS 的波前测量精度可达到  $PV=1.376 \times 10^{-2} \lambda$ ,  $RMS=4 \times 10^{-3} \lambda$  ( $\lambda=625$  nm)。



(a) PV values of residual errors for spherical waves with different curvature radii



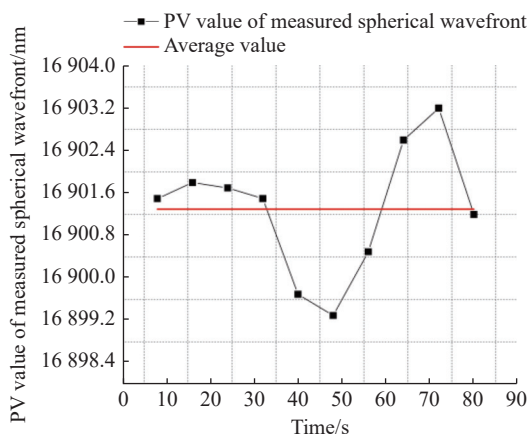
(b) 不同曲率半径球面波的复原误差 RMS 值曲线  
(b) RMS values of residual errors for spherical waves with different curvature radii

图 5 不同曲率半径的球面波前复原误差

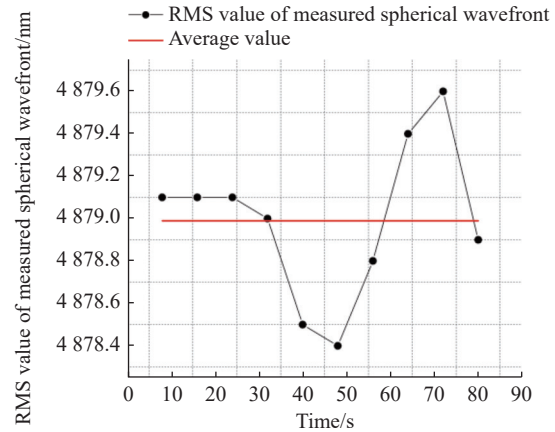
Fig. 5 Residual errors for spherical waves with different curvature radii

### 4.3 重复性精度测试

对上述已完成标定的 SHWFS 的重复性精度进行测试。重复性精度测试方法如下: 在某一曲率半径上(本文取球面波的曲率半径为 1100 mm), 采集 10 帧图像取平均值。为了减少环境带来的影响, 本文取间隔时间为 8 s)。在保持测试对象及其他测试参数不变的情况, 进行测试, 再采集 10 帧图像取平均值。共采集 10 次, 计算每次测量的 PV 值、RMS 值, 取测试结果相较于平均值的最大差值表征 SHWFS 的重复性精度。测试结果如图 6 所示。可得 SHWFS 的重复性精度为  $PV=3.2\times 10^{-3}\lambda$ ,  $RMS=9.76\times 10^{-4}\lambda$  ( $\lambda=625\text{ nm}$ )。



(a) 测量球面波前的 PV 值与测量时间的关系图  
(a) PV value of measured spherical wavefront



(b) 测量球面波前的 RMS 值与测量时间的关系图  
(b) RMS value of measured spherical wavefront

图 6 重复性精度测试结果

Fig. 6 Repeatability of wavefront measurements by the calibrated SHWFS

## 5 结 论

目前大多球面波标定方法均采用有限项代替无限项、二项式拟合等众多的近似, 引入的误差源较多, 此外, 球面波前质量不高, 导致标定后的 SHWFS 测量精度不高, 测量稳定性不足等问题。本文提出了一种高精度、稳定、可行的球面波标定方法, 建立了相应的理论模型。该标定方法利用微透镜子孔径大小与探测器像素大小的紧耦合关系, 减少了 SHWFS 参数计算过程的近似项, 可精确计算出 SHWFS 的微透镜阵列的焦距  $f$  等物理参数。随后, 建立了高精度的球面波标定实验装置, 利用其对子孔径数为  $128\times 128$  的 SHWFS (通光孔径为 12.8 mm) 进行标定。该传感器的球面波前测量精度达到了  $PV=1.376\times 10^{-2}\lambda$ ,  $RMS=4\times 10^{-3}\lambda$  ( $\lambda=625\text{ nm}$ ), 重复性精度为  $PV=3.2\times 10^{-3}\lambda$ ,  $RMS=9.76\times 10^{-4}\lambda$  ( $\lambda=625\text{ nm}$ )。本文提出的高精度球面波标定方法可以为大口径的 SHWFS 完成高精度标定, 提升测量精度。

### 参考文献:

- [1] TYSON R K, FRAZIER B W. *Principles of Adaptive Optics* [M]. 5th ed. Boca Raton: CRC Press, 2022.
- [2] WEI K, LI M, CHEN SH Q, et al.. First light for the sodium laser guide star adaptive optics system on the Lijiang 1.8m telescope[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2016, 16(12): 183.

- [3] SCHÄFER B, LÜBBECKE M, MANN K. Hartmann-Shack wave front measurements for real time determination of laser beam propagation parameters[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(5): 053103.
- [4] SAKHAROV A M, BARYSHNIKOV N V, KARASIK V E, *et al.*. A method for reconstructing the equation of the aspherical surface of mirrors in an explicit form using a device with a wavefront sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11487: 114870B.
- [5] HE Y, DENG G H, WEI L, *et al.*. Design of a compact, bimorph deformable mirror-based adaptive optics scanning laser ophthalmoscope[M]//LUO Q M, LI L Z, HARRISON D K, *et al.*. Oxygen Transport to Tissue XXXVIII. Cham: Springer, 2016: 375-383.
- [6] 朱沁雨, 韩国庆, 彭建涛, 等. 双波长视网膜成像自适应光学系统的轴向色差补偿方法[J]. *中国光学*, 2022, 15(1): 79-89.
- ZHU Q Y, HAN G Q, PENG J T, *et al.*. Longitudinal chromatic aberration compensation method for dual-wavelength retinal imaging adaptive optics systems[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(1): 79-89. (in Chinese).
- [7] 王艳萍, 王茜菡, 马冲. 哈特曼波前分析仪校准方法研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0108003.
- WANG Y P, WANG Q Q, MA CH. Study on Hartmann wavefront analyzer calibration method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 0108003. (in Chinese).
- [8] ARTZNER G. On the absolute calibration of Shack-Hartmann sensors and UV laboratory wavefront measurements[J]. *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A*, 1994, 3(2): 121-132.
- [9] GREIVENKAMP J E, SMITH D G, GOODWIN E. Calibration issues with Shack-Hartmann sensors for metrology applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5252: 372-380.
- [10] CHERNYSHOV A, STERR U, RIEHLE F, *et al.*. Calibration of a Shack-Hartmann sensor for absolute measurements of wavefronts[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(30): 6419-6425.
- [11] NIKITIN A N, GALAKTIONOV I, SHELDAKOVA J, *et al.*. Absolute calibration of a Shack-Hartmann wavefront sensor for measurements of wavefronts[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10925: 109250K.
- [12] BAUTSCH J, SCHAKE M, EHRET G, *et al.*. Traceable calibration of Shack-Hartmann wavefront sensors employing spherical wavefronts[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(8): 084104.
- [13] YANG J SH, WEI L, CHEN H L, *et al.*. Absolute calibration of Hartmann-Shack wavefront sensor by spherical wavefronts[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(6): 910-916.
- [14] 梁春, 沈建新, 童桂, 等. Hartmann-Shack 传感器结构参量的自基准标定[J]. *光子学报*, 2009, 38(4): 780-784.
- LIANG CH, SHEN J X, TONG G, *et al.*. A self-reference method for measuring Hartmann-shack wavefront sensor parameter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(4): 780-784. (in Chinese).
- [15] 周晓斌, 栾亚东, 史雷蕾, 等. 基于已知球面波前的 Hartmann-Shack 传感器结构参量标定[J]. *应用光学*, 2015, 36(6): 909-912.
- ZHOU X B, LUAN Y D, SHI L L, *et al.*. Structural parameters calibration of Hartmann-Shack sensor based on known spherical wavefront[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(6): 909-912. (in Chinese).
- [16] NIKITIN A N, GALAKTIONOV I, SHELDAKOVA J, *et al.*. Calibration of a Shack-Hartmann wavefront sensor using spherical wavefronts from a point source[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 11987: 119870J.
- [17] PLATT B C, SHACK R. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing[J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2001, 17(5): S573-S577.
- [18] BORN M, WOLF E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*[M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

#### 作者简介:



包明帝(1992—),男,安徽蚌埠人,博士研究生,2017年于合肥工业大学机械学院获得硕士学位,主要从事波前探测技术方面研究。E-mail: [baomingdi11@163.com](mailto:baomingdi11@163.com)



史国华(1981—),男,浙江湖州人,博士,研究员,博士生导师,2011年于中国科学院光电技术研究所获得博士学位,主要从事高分辨率眼科成像与检测、在体光学超分辨率成像、活体视觉神经网络等方面的研究。E-mail: [shigh@sibet.ac.cn](mailto:shigh@sibet.ac.cn)