

无调制四棱锥波前传感器的光瞳像标定方法

颜召军¹ 杨朋千² 陈欣扬¹

¹中国科学院上海天文台光学天文技术研究室, 上海 200030

²中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

摘要 四棱锥波前传感器具有空间采样率高和光能利用率高等优点。要准确地从光瞳像中提取待测波前的斜率信息, 需要事先对光瞳像的尺寸和位置进行标定。分析了光瞳像尺寸标定误差和位置标定误差对自适应光学系统闭环校正效果的影响。提出了一种对无调制四棱锥波前传感器光瞳像进行标定的方法, 并在考虑系统像差和探测噪声的条件下对该方法进行了多次仿真实验验证。分析结果表明, 即使系统存在像差(均方根小于 1.7λ), 该方法仍可以对光瞳像的尺寸和位置进行准确标定。该方法可应用于实际自适应光学系统。

关键词 大气光学; 自适应光学; 四棱锥波前传感器; 光瞳像; 标定

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0601002

Pupil Calibration Method of Non-Modulation Pyramid Wavefront Sensor

Yan Zhaojun¹ Yang Pengqian² Chen Xinyang¹

¹The Astronomical Optical Instrument Group, Shanghai Astronomical Observatory,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

²key Joint Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Pyramid wavefront sensor (PWFS) has the advantages of high spatial resolution and light utility efficiency. To correctly extract slope information of the wavefront from the pupil images of PWFS, the dimension and position of the pupils should be calibrated in advance. The effects of the dimension and position calibration errors of the pupils on close-loop performance of adaptive optics system are investigated. The pupil calibration method of non-modulation pyramid wavefront sensor is proposed, and this method is verified by many times of simulated experiments under the conditions that system aberration and detection noise are considered. The simulation results show that the proposed method can calibrate the pupils accurately in the face of system aberration (its root mean square value is below 1.7λ). The method can be applied to the practical adaptive optics systems.

Key words atmospheric optics; adaptive optics; pyramid wavefront sensor; pupil image; calibration

OCIS codes 010.1080; 230.0040; 010.3310; 120.4820

1 引 言

自适应光学系统是一种实时测量和校正波前像差的系统, 可校正系统自身的像差和光波传输路径上媒质不稳定而引起的波前畸变^[1]。自适应光学系统的组成主要包括变形镜和波前传感器^[2-4]。变形镜受控制信号的驱动可实时改变面形从而对波前畸变进行补偿校正。驱动变形镜的控制信号来自于波前传感器^[5]。波前传感器探测精度直接影响系统闭环校正效果^[6-7]。目前常用的波前传感器如哈特曼波前传感器技术已非常成熟, 广泛应用于波前检测和自适应光学领域。近年来一种新的波前传感器-四棱锥波前传感器(PWFS)已成为研究热点^[8]。

收稿日期: 2016-01-15; 收到修改稿日期: 2016-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(11403079)

作者简介: 颜召军(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事自适应光学和天文光干涉技术方面的研究。

E-mail: zhaojunyan@shao.ac.cn

PWFS 概念基于刀口法探测原理,最早由 Ragazzoni 等^[9]发明。在研究 PWFS 的初期,Ragazzoni 认为需要在该波前传感器中引入调制信号,这使 PWFS 的实现变得复杂。经过不断地实验和研究,Ragazzoni 证明了在不引入调制信号的情况下也可以使 PWFS 很好地工作^[10]。自此,PWFS 技术得到了快速发展和广泛应用^[11-13],将天文观测带到了一个新的高度。PWFS 在多层共轭自适应光学系统中的应用体现了它比哈特曼波前传感器具有更高光能利用率和空间采样率的优点,已日渐成为一种热门新型波前传感器^[14]。中国科学院光电技术研究所对无调制两面锥和四棱锥波前传感器进行了理论分析与实验研究^[15-17];中国科学院上海天文台对 PWFS 在调制状态下的工作原理进行了分析,开展了单孔径波前倾斜检测及双孔径光程差检测的初步研究^[18-19]。

根据 PWFS 的工作原理可知,光瞳像的尺寸和位置决定了从光瞳像中提取的待测波前斜率信息和波前复原矩阵的准确性。因此,PWFS 在实际系统中应用时,需要事先对光瞳像的尺寸和位置进行准确标定,这是其实现准确波前探测的关键。光瞳像标定误差将直接影响波前探测准确性,进而影响自适应光学系统闭环校正效果。本文阐明了无调制 PWFS 基本工作原理,分析了光瞳像标定误差对闭环校正效果的影响,继而提出了一种对 PWFS 光瞳像进行标定的方法,最后在考虑了系统像差和探测噪声的条件下对该方法进行了仿真实验验证和分析。

2 无调制 PWFS 基本理论

无调制 PWFS 的工作原理及光路如图 1 所示。四棱锥位于透镜 L_1 (焦距为 f_1) 的焦点位置,入射波前(通光口径为 D)经过透镜 L_1 后聚焦在四棱锥尖顶,后被其分成了 4 束,这 4 束光经过透镜 L_2 (焦距为 f_2) 后在其焦平面位置处的电荷耦合器件(CCD)上形成 4 个光瞳像,其光强分别为 I_1, I_2, I_3, I_4 。

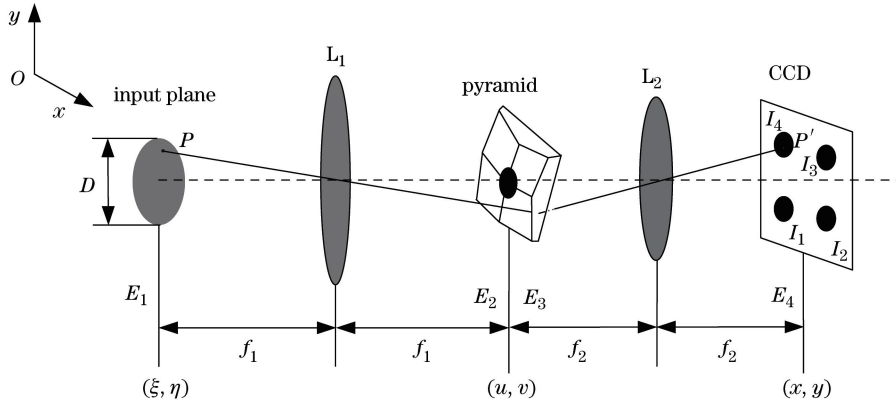


图 1 无调制 PWFS 光路图

Fig. 1 Configuration of the optical path of PWFS without modulation

入射光瞳处光场函数为

$$E_1(\xi, \eta) = u_0 \exp[i\varphi(\xi, \eta)] P_u(\xi, \eta), \quad (1)$$

式中 u_0 为入射光场振幅, $P_u(\xi, \eta)$ 为光瞳函数, $\varphi(\xi, \eta)$ 为入射波前相位, (ξ, η) 为入射光瞳面空间坐标。光场 $E_1(\xi, \eta)$ 传播到透镜 L_1 的焦平面处的光场为

$$E_2(u, v) = \frac{1}{\lambda f_1} \mathcal{F}[E_1(\xi, \eta)]_{(\frac{u}{\lambda f_1}, \frac{v}{\lambda f_1})}, \quad (2)$$

式中 λ 为波长, (u, v) 为 E_2 处空间频率坐标, \mathcal{F} 表示二维傅里叶变换。四棱锥在整个光路中的作用等同于改变了波前的振幅或相位,这种作用通常用两种模型描述:振幅掩膜模型^[20]和相位掩膜模型^[21]。采用相位掩膜模型来描述 PWFS 的这种物理作用,此时 PWFS 对波前相位的改变可用相位延迟函数表示

$$\Phi_P = \exp[-i2\pi\alpha_0(|u| + |v|)], \quad (3)$$

式中 α_0 为四棱锥侧面与底面夹角。于是入射波前经过 PWFS 之后光场为

$$E_3(u, v) = E_2(u, v)\Phi_P. \quad (4)$$

入射波前在 CCD 位置处光场为

$$E_4(x, y) = \frac{1}{\lambda f_2} \mathcal{F}[E_3(u, v)]_{(\frac{x}{\lambda f_2}, \frac{y}{\lambda f_2})} \quad (5)$$

将 $E_4(x, y)$ 取模的平方得到入射波前在 CCD 上的光瞳像光强分布, 其中 (x, y) 为 CCD 上的空间坐标。计算 CCD 上 4 个光瞳像在 x 方向和 y 方向的光强差, 得到波前在 x 和 y 方向上的斜率为

$$S_x(x, y) = \frac{[I_1(x, y) + I_4(x, y)] - [I_2(x, y) + I_3(x, y)]}{\sum_{i=1}^4 I_i(x, y)}, \quad (6)$$

$$S_y(x, y) = \frac{[I_3(x, y) + I_4(x, y)] - [I_1(x, y) + I_2(x, y)]}{\sum_{i=1}^4 I_i(x, y)}. \quad (7)$$

对于无调制 PWFS 的衍射理论研究表明其线性探测范围很小, 一般用于自适应光学系统对波前进行闭环探测, 进而实现闭环校正^[20-21]。实现闭环探测与校正的核心是响应矩阵。获得响应矩阵的一种方法是实测法, 即在实际系统中利用波前校正器产生一定大小的波前, 根据光瞳像信息计算波前斜率, 进而获得响应矩阵。响应矩阵实测法的缺点是易受系统像差和噪声的影响。另一种获取响应矩阵的方法是非实测法, 即根据 PWFS 衍射理论计算响应矩阵^[16]。非实测法获得响应矩阵的计算过程如下。

用泽尼克多项式表示待测波前为 $\varphi(x, y) = \sum_{m=1}^p a_m Z_m(x, y)$, p 为泽尼克多项式的阶数, a_m 表示第 m 阶泽尼克多项式 Z_m 的系数^[22]。当待测波前 $\varphi(x, y)$ 较小时 PWFS 探测到的波前斜率信号可简化为

$$S_x(x, y) = \sum_{m=1}^p a_m \left[\int_{-B(y)}^{B(y)} v \frac{Z_m(x, y) - Z_m(x', y)}{\pi(x - x')} dx' \right], \quad (8)$$

$$S_y(x, y) = \sum_{m=1}^p a_m \left[\int_{-B(y)}^{B(y)} v \frac{Z_m(x, y) - Z_m(x, y')}{\pi(y - y')} dy' \right], \quad (9)$$

式中积分上下限 $B(x)$ 和 $B(y)$ 表示过点 (x, y) 且垂直于坐标轴的直线与光瞳函数边界的交点, v 示与入射光能量有关的系数^[20-21]。将(8)、(9)式的矩阵形式:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \end{bmatrix} = \mathbf{C}\mathbf{A}, \quad (10)$$

式中 \mathbf{S} 是 PWFS 探测到的波前斜率向量, \mathbf{A} 是待测波前泽尼克模式系数向量; \mathbf{C} 是响应矩阵。

由(8)、(9)式可知 PWFS 的响应矩阵很难求得解析解, 通常采用数值求解的方法计算得到响应矩阵。非实测数值求解响应矩阵的过程可以描述为

$$\begin{bmatrix} S_{1x}(Z_1) & \cdots & S_{1x}(Z_p) \\ S_{1y}(Z_1) & \cdots & S_{1y}(Z_p) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ S_{Nx}(Z_1) & \cdots & S_{Nx}(Z_p) \\ S_{Ny}(Z_1) & \cdots & S_{Ny}(Z_p) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} C_{1x}(Z_1) & \cdots & C_{1x}(Z_p) \\ C_{1y}(Z_1) & \cdots & C_{1y}(Z_p) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ C_{Nx}(Z_1) & \cdots & C_{Nx}(Z_p) \\ C_{Ny}(Z_1) & \cdots & C_{Ny}(Z_p) \end{bmatrix}}_{\text{corresponding matrix, } \mathbf{C}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} T & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & T & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & T \end{bmatrix}}_{\mathbf{p} \times \mathbf{p}}, \quad (11)$$

式中, $S_{ix}(Z_j)$ 和 $S_{iy}(Z_j)$ 分别表示输入波前是第 j 阶泽尼克模式时, 从光瞳像中提取的第 i 个子像素在 x 方向和 y 方向上的波前斜率, N 是有效的子孔径总数。依次引入均方根(RMS)为 T 的各阶泽尼克模式作为入射波前, 记录 PWFS 探测到的波前斜率数据, 即可得到(11)式。对(11)式进行奇异值分解后可求解得到响应矩阵 \mathbf{C} 的逆矩阵-复原矩阵 \mathbf{C}^+ 。如果 PWFS 获得的波前斜率为 S_c , 则此时复原得到待测波前的泽尼克模式的系数向量为

$$\mathbf{A}_c = \mathbf{C}^+ \mathbf{S}_c. \quad (12)$$

响应矩阵非实测法虽不受系统像差和噪声的影响, 但需要事先获取光瞳像的尺寸和位置信息。光瞳像的尺寸信息用于确定响应矩阵的维数, 光瞳像尺寸及位置信息用于从光瞳像中提取正确的波前斜率信息。因此, PWFS 用于波前探测时需要对其光瞳像尺寸及位置进行准确标定。

3 光瞳像标定误差的影响

为了分析光瞳像标定误差对闭环校正效果的影响,仿真中给光瞳像引入标定误差,在此条件下利用无调制 PWFS 对静态大气湍流进行探测,采用非实测法获得响应矩阵,进而进行波前闭环校正。仿真中不考虑光子噪声、CCD 噪声。

3.1 仿真参数

入射光瞳直径为 30 mm,透镜 L_1 焦距为 900 mm,透镜 L_2 焦距为 150 mm。CCD 靶面大小为 256 pixel \times 256 pixel,像元大小为 4 $\mu\text{m}\times$ 4 μm ,像元深度为 14 bit,仿真中控制每帧采集图像最大灰度值约为 13000。四棱锥所用材料折射率为 1.7,其锥侧面与底面的夹角约为 4.83 $^\circ$ 。非相邻光瞳像的中心间距与光瞳像大小的比值约为 3.54,此时 4 个光瞳像在 CCD 上彼此不重叠,理论上 CCD 上光瞳像直径为 51 pixel。

3.2 静态像差闭环校正

仿真中模拟的入射波前像差由前 36 阶泽尼克模式组成(以下仿真中模拟的波前均由前 36 阶泽尼克模式组成),大小用 d/r_0 描述, d 为通光口径, r_0 为大气相干长度。波前闭环校正迭代方程为

$$\mathbf{W}(k+1) = \mathbf{W}(k) - g \mathbf{W}_r(k), \quad (13)$$

式中 $\mathbf{W}(k)$ 为第 k 帧的波前残差, g 为比例积分控制增益(仿真中选取了合适的数值以保证闭环稳定性), $\mathbf{W}_r(k)$ 是第 k 帧的复原残差波前。

根据以上参数,可以计算出光瞳像在 CCD 上的理论位置。为了分析光瞳像位置偏差对闭环校正效果的影响,仿真中光瞳像的标定位置与其真实位置存在一定的偏移,偏移方向如图 2 所示。光瞳像在 x, y 方向上偏移大小相同,分别为 0、1、2、3 pixel。获取存在位置偏移的光瞳像位置之后(光瞳像大小采用理论计算值),利用(11)式描述的非实测法计算响应矩阵,然后对 $d/r_0 = 50$ (RMS 为 0.96 λ) 的静态波前畸变进行闭环校正,闭环结果如图 3 所示。

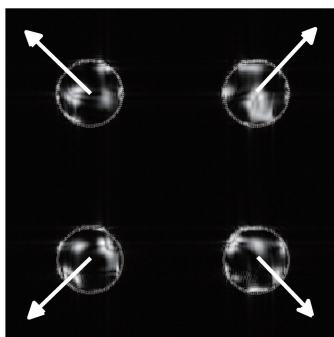


图 2 光瞳像位置偏移示意图

Fig. 2 Illustration of the deviation of the pupil images

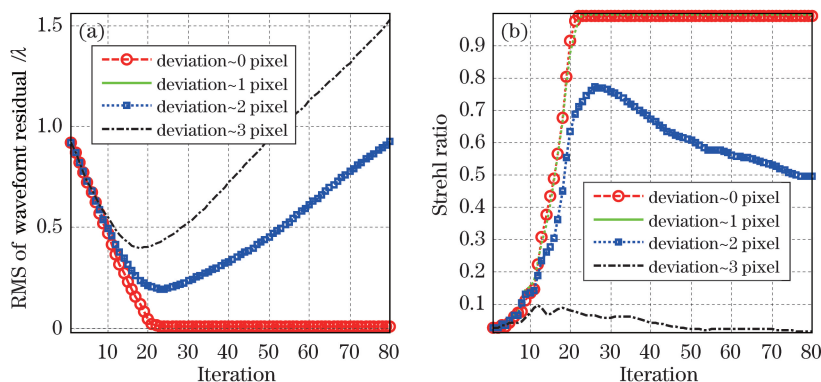


图 3 有光瞳像位置标定误差时(a)波前残差 RMS 值迭代曲线和(b)斯特列尔比迭代曲线

Fig. 3 (a) Plot of RMS of wavefront residual versus iteration and (b) plot of Strehl ratio versus iteration with different position calibration errors of pupils

从图 3 可以看出:当光瞳像位置偏差小于或等于 1 pixel 时,对 $d/r_0=50$ 的波前进行闭环校正之后的斯特列尔比接近 1;当该偏差继续增大时,闭环校正之后的波前残差也逐渐增大,光瞳像位置偏差影响闭环校正结果,且当该偏差达到 2 pixel 时,闭环校正失效。仿真结果表明光瞳像位置标定误差会影响闭环校正效果,光瞳像位置标定误差不能大于 1 pixel。

图 4 是光瞳像尺寸存在标定误差时的仿真结果(此时光瞳像位置无标定误差),光瞳像直径分别为 51、61、71 pixel(响应矩阵中采用的子孔径个数分别为 51×51 、 61×61 、 71×71)。理论上 CCD 上每个光瞳像直径均为 51 pixel,但仿真中即使光瞳像尺寸存在 20 pixel 的标定误差,波前闭环残差 RMS 值和斯特列尔比仍然与无标定误差时的结果相近。图 4 的仿真结果说明光瞳像尺寸标定误差对闭环校正效果影响较小。理论上,当光瞳像尺寸取得过大时,提取的波前斜率信息中包含了光瞳像外的噪声,噪声的引入会影响波前探测精度。因此,光瞳像尺寸标定误差控制在 1~2 pixel 为宜。

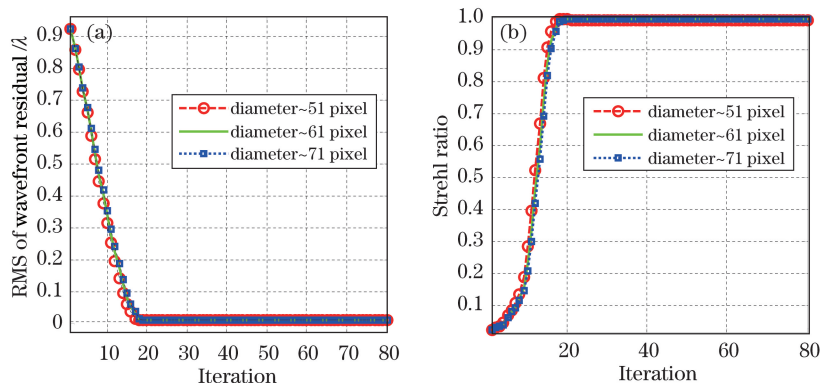


图 4 有光瞳像尺寸标定误差时(a)波前残差 RMS 值迭代曲线和(b)斯特列尔比迭代曲线

Fig. 4 (a) Plot of RMS of wavefront residual versus iteration and (b) plot of Strehl ratio versus iteration with different dimension calibration errors of pupils

4 光瞳像标定方法及仿真结果

标定光瞳像的目的是获得 4 个光瞳像在 CCD 上的位置和尺寸。只有准确地对光瞳像进行标定,才能够从光瞳像中提取准确的波前斜率信息。实际光学系统都存在像差,会影响光瞳像的标定。图 5 是存在系统像差时的光瞳像(像差 RMS 为 1.3λ ,其泽尼克系数见图 6),系统像差导致光瞳像边缘模糊,很难从该图像准确地对 4 个光瞳像的尺寸和位置进行标定。下面将详细介绍一种光瞳像标定方法,并对该方法进行仿真验证。仿真的主要参数同 3.1。仿真中考虑了系统像差和探测噪声,控制每帧图像的最大灰度值约为 13000,每帧图像中都加入了白噪声,白噪声均值为 1000,方差为 100。

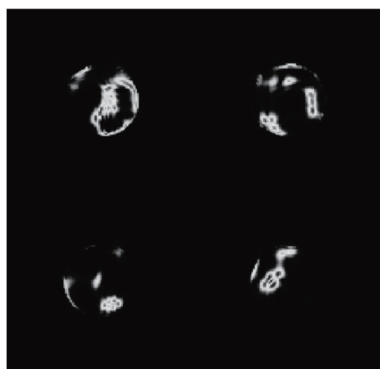


图 5 系统存在像差时的光瞳像

Fig. 5 Image of the pupils when the system has aberration

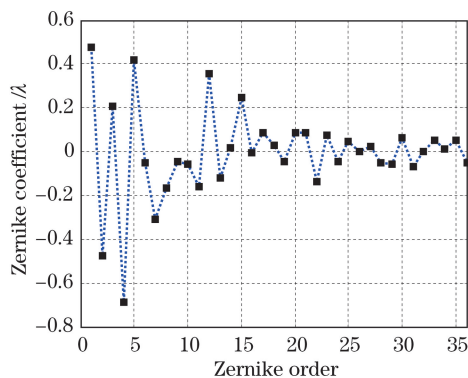


图 6 系统像差泽尼克系数

Fig. 6 Zernike coefficient of the system aberration

4.1 光瞳像位置标定方法

如果光瞳像边缘清晰,此时可以较容易地从光瞳像边缘信息中提取每个子光瞳像的圆心和半径,从而实

现对光瞳像的准确标定。系统像差的存在导致光瞳像边缘模糊,难以对子光瞳像的圆心和半径进行标定。为了增强光瞳像边缘对比度,考虑一种像差“调制”的方法,即利用波前校正器作为“调制工具”引入“调制波前”,采集多帧光瞳像并叠加以增强图像边缘清晰度,然后对其进行滤波去噪、边缘检测处理,最后对光瞳像尺寸和位置进行标定。详细标定方法和步骤如下:

1)首先让系统中的波前校正器产生一系列的随机湍流波前,记录对应帧光瞳像 I_k (假设共有 M 帧),此时PWFS探测的波前是系统像差和“调制”引入的波前之和;

$$2) \text{计算多帧光瞳像的和 } \hat{I}, \hat{I} = \sum_{k=1}^M I_k;$$

3)对光瞳像 \hat{I} 进行滤波处理(去除噪声),然后进行边缘检测处理,经滤波去噪和边缘检测之后的图像记为 I_{NS} ;

4)对图像 I_{NS} 中的每个像素灰度值进行二值化处理得到新的图像 I_b ,

$$I_b(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{if } I_{NS}(t; i, j) < \max[I_{NS}(t)]/2, t = 1, 2, 3, 4 \\ 1, & \text{if } I_{NS}(t; i, j) > \max[I_{NS}(t)]/2, t = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (14)$$

式中 (i, j) 表示像素位置, $\max[I_{NS}(t)]$ 表示第 t 个子光瞳像所在等分区域 $I_{NS}(t)$ 的最大灰度值(将整个CCD靶面等分成4个区域,每个区域包含一个子光瞳像的完整信息);

5)将第 t 个等分区域中满足 $I_b(i, j) = 1$ 的点的集合记为 $A_t[(i, j)]$,集合中的点处在以 $[O_x(t), O_y(t)]$ 为圆心,以 $O_r(t)$ 为半径的圆上,因此满足方程:

$$[i - O_x(t)]^2 + [j - O_y(t)]^2 \approx O_r(t)^2. \quad (15)$$

利用最小二乘法可求解得到 $O_x(t)$ 、 $O_y(t)$ 、 $O_r(t)$ 的最优值。将 $O_x(t)$ 、 $O_y(t)$ 做四舍五入后保留整数,作为最终的子光瞳像圆心坐标。取 $O_r(t)$ 的均值,保留整数部分作为统一的子光瞳像半径。

4.2 光瞳像位置标定方法仿真

对上述光瞳像标定方法进行了仿真验证。系统静态像差如图6所示。随机产生由前36阶泽尼克多项式组成的湍流波前作为“调制”输入波前(步骤1),大小为 $d/r_0 = 30$ 。共采集了10000帧光瞳像信息,叠加后的光瞳像如图7(a)所示(步骤2),然后对其进行高斯滤波和边缘检测处理(采用“Sobel”算子)得到图7(b)所示的光瞳像(步骤3)。对图7(b)进行二值化处理得到图8(a)所示的光瞳像(步骤4)。根据图8(a)中的数据信息计算得到子光瞳像圆心和半径(步骤5),光瞳像标定结果如图8(b)所示。

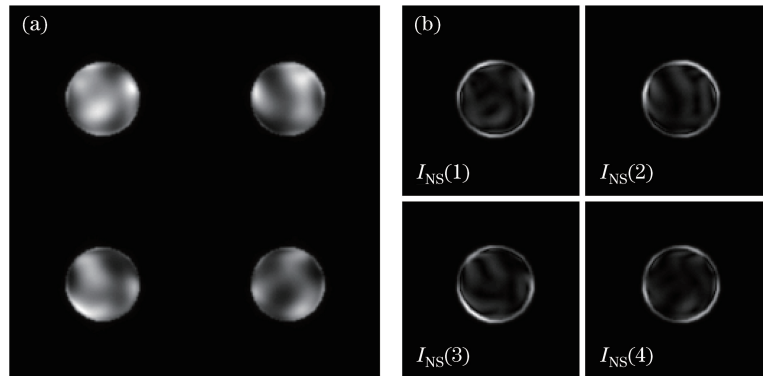


图7 (a)“调制”叠加后的光瞳像;(b)滤波和边缘检测后的光瞳像

Fig. 7 (a) Image of superimposed pupils after modulation; (b) image of pupils after filtering and edge detecting

确定了子光瞳像尺寸之后,依据(11)式计算得到响应矩阵及复原矩阵,进而对系统静态像差进行探测与闭环校正。波前残差的斯特列尔比以及RMS值随迭代次数变化曲线分别如图9(a)和(b)所示。校正之后波前残差的斯特列尔比接近1,其RMS值达到 0.008λ ,说明闭环校正效果良好,同时也说明了上述方法可以准确对光瞳像尺寸和位置进行标定。

为了进一步检测上述标定方法的准确性,在不同大小系统像差条件下进行了重复性测试。随机产生由前36阶泽尼克多项式组成的波前作为系统像差,依据以上方法对光瞳像进行标定,然后进行波前探测与闭

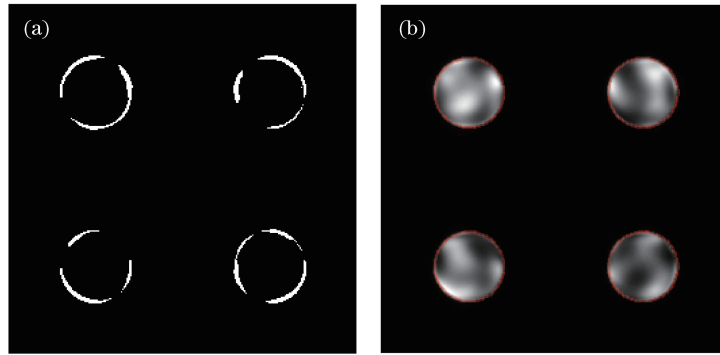


图 8 (a)“二值化”处理之后的光瞳像;(b)标定后的光瞳像

Fig. 8 (a) Image of pupils after binarization processing; (b) image of pupils after calibration

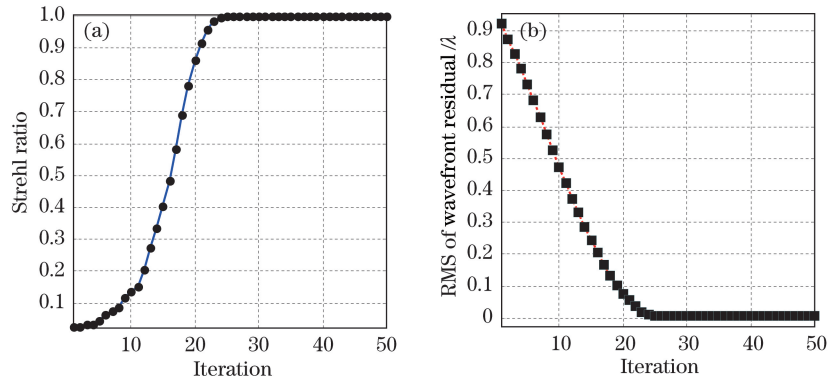


图 9 (a)斯特列尔比迭代曲线;(b)波前残差 RMS 值迭代曲线

Fig. 9 (a) Plot of Strehl ratio versus iteration; (b) plot of RMS of wavefront residual versus iteration

环校正。系统像差及闭环校正残差的 RMS 值分别如图 10(a)和(b)所示。图 10 所示的结果说明了当系统像差 RMS 小于 1.7λ 时,闭环校正残差的 RMS 值都小于 0.01λ ,验证了上述光瞳像标定方法的正确性。

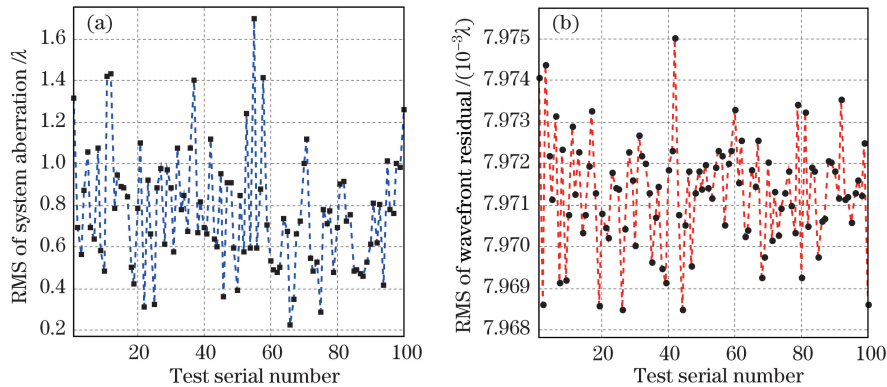


图 10 100 次随机测试时(a)系统像差 RMS 值;(b)闭环校正波前残差的 RMS 值

Fig. 10 (a) RMS values of system aberration and (b) RMS values of wavefront residual after close-loop correction in 100 trials of random test

5 结 论

介绍了无调制 PWFS 基本工作原理,仿真分析了光瞳像尺寸和位置标定误差对自适应光学系统闭环校正效果的影响,提出了一种对光瞳像尺寸和位置同时进行标定的方法,并在有探测噪声和系统像差的条件下对该方法进行了仿真验证。仿真分析表明要取得较好的闭环校正结果,光瞳像位置标定误差不能大于 1 pixel,光瞳像尺寸标定误差需控制在 2 pixel 以内。仿真验证结果表明,当系统像差均方根小于 1.7λ 时,该方法都可以准确对光瞳像进行标定,且波前闭环校正残差均方根小于 0.01λ 。该标定方法工作稳定,适应性

强,且实现简单,无需改变光学系统原有结构或增加额外的器件,可应用于四棱锥波前传感器室内实验以及天文自适应光学系统,也适用于对调制四棱锥波前传感器光瞳像进行尺寸和位置的标定。

参 考 文 献

- 1 Jiang Wenhan, Zhang Yudong, Rao Changhui, *et al.*. Progress on adaptive optics of institute of optics and electronics, Chinese Academy of Sciences[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900106.
姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900106.
- 2 Luo Qi, Li Xinyang. Control performance analysis of a double overlap adaptive optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0501002.
罗 奇, 李新阳. 嵌套双自适应光学系统的控制特性分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0501002.
- 3 Liu Minshi, Wang Xiaoman, Jing Wenbo, *et al.*. Design of parameters of Shack-Hartmann wave-front sensor for laser-beam quality measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0328002.
刘敏时, 王晓曼, 景文博, 等. 用于激光光束检测的夏克哈特曼传感器参量设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0328002.
- 4 Chen Shanqiu, Liu Chao, Xu Bing, *et al.*. Design of generic adaptive optics wave-front real-time processor[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(12): 1212001.
陈善球, 刘 超, 许 冰, 等. 通用自适应光学波前实时处理机的设计[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1212001.
- 5 Yan Zhaojun, Li Xinyang, Rao Changhui. Multi-channel adaptive control algorithm for closed-loop adaptive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0301002.
颜召军, 李新阳, 饶长辉. 自适应光学闭环系统实时多路自适应控制算法[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0301002.
- 6 Li Jing, Gong Yan, Hu Xinrong, *et al.*. A high-precision centroid detecting method for Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0316002.
李 晶, 巩 岩, 呼新荣, 等. 哈特曼夏克波前传感器的高精度质心探测方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0316002.
- 7 Shen Feng, Jiang Wenhan. The measurement error of wavefront phase with Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(5): 666-671.
沈 锋, 姜文汉. 夏克-哈特曼波前传感器的波前相位探测误差[J]. *光学学报*, 2000, 20(5): 666-671.
- 8 C Verinaud. On the nature of the measurements provided by a pyramid wave-front sensor[J]. *Opt Commun*, 2004, 233(1): 27-38.
- 9 R Ragazzoni. Pupil plane wavefront sensing with an oscillating prism[J]. *Journal of Modern Optics*, 1996, 43(2): 289-293.
- 10 R Ragazzoni, E Diolaiti, E Vernet. A pyramid wavefront sensor with no dynamic modulation[J]. *Opt Commun*, 2002, 208(1): 51-60.
- 11 S Esposito, A Riccardi, F Quirós-Pacheco, *et al.*. Laboratory characterization and performance of the high-order adaptive optics system for the large binocular telescope[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(31): 174-189.
- 12 J M Hill. The large binocular telescope[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(16): 115-122.
- 13 I Shatokhina, A Obereder, M Rosenstainer, *et al.*. Preprocessed cumulative reconstructor with domain decomposition: a fast wavefront reconstruction method for pyramid wavefront sensor[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(12): 2640-2652.
- 14 Yan Zhaojun, Yang Pengqian. Modalreconstruction for three-dimensional wavefront of atmosphere turbulence in star oriented multi-conjugate adaptive optics[J]. *Chinese J 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.
- 15 Wang Jianxin, Bai Fuzhong, Ning Yu, *et al.*. Diffraction theory analysis and numerical simulation of non-modulation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(2): 846-852.
王建新, 白福忠, 宁 禹, 等. 无调制两面棱锥波前传感器的衍射理论分析和数值仿真[J]. *物理学报*, 2011, 60(2): 846-852.
- 16 J Wang, F Bai, Y Ning, *et al.*. Wavefront response matrix for closed-loop adaptive optics system based on non-modulation pyramid wavefront sensor[J]. *Opt Commun*, 2012, 285(12): 2814-2820.
- 17 J Wang, F Bai, Y Ning, *et al.*. Comparison between non-modulation four-sided and two-sided pyramid wavefront sensor [J]. *Opt Express*, 2011, 18(26): 27534-27549.
- 18 Chen Xinyang, Zhu Nenghong. The design of software simulation based on pyramid wavefront sensor[J]. *Progress in*

Astronomy, 2006, 24(4): 362-372.

陈欣扬, 朱能鸿. 基于四棱锥波前传感器的波前检测仿真设计[J]. 天文学进展, 2006, 24(4): 362-372.

- 19 Zhu Nenghong, Chen Xinyang, Zhou Dan, *et al.*. Study on measuring piston error of segmented mirror using pyramid sensor[J]. Journal of Transduction Technology. 2009, 22(3): 433-437.
朱能鸿, 陈欣扬, 周 丹, 等. 利用四棱锥传感器检测光学拼接镜的法向光程差[J]. 传感技术学报, 2009, 22(3): 433-437.
- 20 S Esposito, A Riccardi. Pyramidwavefront sensor behavior in partial correction adaptive optics systems[J]. Astronomy & Astrophysics , 2001, 369(2): 9-12.
- 21 M Carbillet, C Vérinaud, B Femenía, *et al.*. Modeling astronomical adaptive optics[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2005, 356(4): 1236-1275.
- 22 R J Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. J Opt Soc Am, 1976, 66(3): 207-211.