

光学学报

基于相位恢复的无调制四棱锥波前传感器

王中旗^{1,2,3}, 陆彦婷^{1,2*}

¹中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

²中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏 南京 210042;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 四棱锥波前传感器具有能量利用率高和空间采样率高的优点,已成功应用于天文自适应光学、镜面检测及显微成像等领域。提出一种新的无调制四棱锥波前传感器,根据四棱锥波前传感器的光场传播模型,利用相位恢复算法迭代优化出待测波前。入射光经四棱锥锥尖分光后会聚所得的子光瞳像为相位恢复算法提供了丰富的信息,使其收敛速度加快。数值模拟结果表明,基于相位恢复的四棱锥波前传感器具有精度高、收敛速度快、抗噪性好等特点,并且无需调制便能获得较大的动态范围。

关键词 传感器; 波前传感; 四棱锥波前传感器; 相位恢复; 自适应光学

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221418

1 引言

光传播路径中因传播介质的不均匀性引起的相位变化会降低光学系统的成像质量,例如大气湍流所造成的波前畸变会令望远镜所获得的星象模糊^[1-2]。在另一些场景下,波前畸变作为被测对象又被人引入。例如:在生物医学领域中,透明生物组织的不规则介质特性引起的相位变化可以直接反映样本样貌,人们通过探测透明生物样本引入的波前畸变来完成对透明生物样本的测量^[3-5]。因此,对波前畸变的准确探测一直是光学领域中的重要课题。目前,研究人员已提出一系列波前传感器,包括夏克-哈特曼传感器(SHWFS)、剪切干涉仪、曲率传感器等。其中,SHWFS由于具有测量精度高、使用方法简单等优势,是目前应用最广泛的波前传感器之一,但其空间采样率和动态范围受限于微透镜尺寸大小^[6]。四棱锥波前传感器(PWFS)^[7]是一种新型的波前传感器,相比于经典的SHWFS,具有能量利用率高和空间采样率高的优点^[8]。随着相关技术的不断发展,PWFS的应用领域不断扩大。目前已有数台地基大口径望远镜采用PWFS作为其自适应光学系统的波前传感器^[9-10];在镜面共相检测方面,PWFS能够达到纳米级微位移的测量精度^[11-12];在生物医学领域,PWFS实现了对透明细胞的相位成像^[13]以及人眼像差的高速测量^[14-15]。

PWFS的核心思想是利用四棱锥锥尖的分光作

用,产生反映波前信息的4个子光瞳像,由此计算待测波前的斜率,进而重建波前。为使4个子光瞳像准确反映波前信息,并增大传感器的动态范围,通常采用调制的方式使到达锥尖处的光斑能够覆盖4个锥面。常用的调制方式有机械调制^[16]、静态调制^[17]和动态像差调制^[18-19]。机械调制方式通过振荡四棱锥本身或者系统入瞳处的倾斜镜增大光斑在四棱锥尖的覆盖范围,从而增大PWFS的线性范围和动态范围,但PWFS的灵敏度会随着调制量的增大而降低,且系统的复杂度较高。静态调制方式通过在光路中引入扩散片来增大四棱锥锥尖处的光斑大小,通过选择不同散射角的扩散片可以改变调制量,使用时需根据不同调制量需求更换扩散片。近年来,PWFS多采用无调制工作方式,这种方式根据畸变波前使光束在焦面上成具有一定面积光斑的现象,利用变化快速而无法被探测到的像差作为调制信号,实现动态像差调制。因为动态像差调制所提供的调制量有限,无调制PWFS的线性范围和动态范围较小,一般需预先校正整体倾斜并在闭环自适应光学系统中使用^[20-21]。有研究工作通过改进变形镜到传感器的响应矩阵的线性来提升闭环自适应光学系统中无调制PWFS的工作性能^[22]。以上方法无论是机械调制、静态调制还是动态像差调制,都以牺牲PWFS的灵敏度换取其动态范围和线性范围的增加,这给PWFS的广泛应用增添了困难。

本文将 Gerchberg-Saxton 迭代优化相位恢复算

收稿日期: 2022-07-04; 修回日期: 2022-08-15; 录用日期: 2022-09-22; 网络首发日期: 2022-10-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11873069)

通信作者: *ytlu@niaot.ac.cn

法^[23]引入四棱锥波前传感器的波前重建环节,提出一种具有大动态范围的无调制四棱锥波前传感器,简称为 Py-GS。已有研究工作尝试将相位恢复与四棱锥波前传感器相结合^[24],但该研究将四棱锥锥尖平面四切分后分别进行传播和优化迭代,仍未脱离调制工作模式的制约,因而动态范围有限,且求解过程复杂。本文根据四棱锥波前传感器的光场传播模型设计两平面迭代相位恢复算法,将四棱锥分光后会聚至图像传感器的 2×2 子瞳面像阵列整体进行迭代优化,并非对每个子光瞳像单独进行迭代优化,从而使 Py-GS 的动态范围不受光斑大小与位置约束,且使其无需工作在调制模式下,并且子光瞳像的丰富信息使 Py-GS 算法的收敛速度较快。数值模拟结果表明,Py-GS 能够以较

高精度重建波前,相对于普通相位恢复算法收敛速度快,比经典的 PWFS 具有更大的动态范围。

2 基本原理

2.1 传感器结构

Py-GS 采用 $4f$ 配置的 PWFS 结构^[25],由前置透镜、四棱锥、中继透镜和图像传感器 4 部分组成,前置透镜和中继透镜构成一个 $4f$ 系统,四棱锥和图像传感器分别放置在两个透镜的焦面处。如图 1 所示,前置透镜 lens1(焦距为 f_1)将入射光线聚焦到四棱锥锥尖,光线在四棱锥 4 个面上朝不同方向发生偏折后,光束被分成 4 束,再经中继透镜 lens2(焦距为 f_2)会聚到图像传感器面,形成 4 个子光瞳像,该过程的光场传播描述如下。

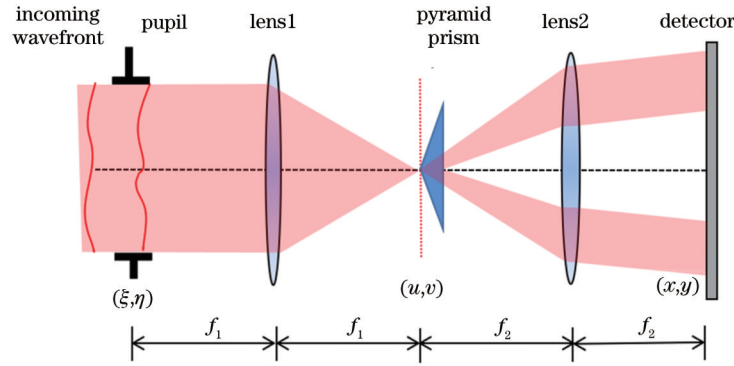


图 1 Py-GS 结构示意图

Fig. 1 Schematic of structure of Py-GS

图 1 中 pupil 所示入射瞳面处的相位设为 $\varphi_0(\xi, \eta)$,即待测相位。假设瞳面各处振幅均匀,记为 A_0 ,则瞳面 (ξ, η) 处的复振幅可以表示为

$$E_1(\xi, \eta) = A_0 \exp[i\varphi_0(\xi, \eta)]P(\xi, \eta), \quad (1)$$

式中: $P(\xi, \eta)$ 为瞳函数,其表达式为

$$P(\xi, \eta) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \xi^2 + \eta^2 \leq R^2 \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: R 为光瞳半径。四棱锥锥尖面的光场复振幅可通过傅里叶变换得到:

$$E_2(u, v) = \frac{1}{\lambda f_1} \mathcal{F}[E_1(\xi, \eta)], \quad (3)$$

式中: λ 为波长; f_1 为前置透镜焦距; (u, v) 为四棱锥锥尖面的空间坐标; \mathcal{F} 表示二维傅里叶变换。

四棱锥对波前相位的改变可用相位延迟函数表示:

$$\phi = \exp[-i2\pi\alpha_0(|u| + |v|)], \quad (4)$$

式中: α_0 为四棱锥侧面与底面的夹角 α 以及折射率 n 的函数,其表达式为

$$\alpha_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{n-1}{\lambda} \alpha. \quad (5)$$

于是刚过四棱锥之后的光场^[26]可表示为

$$E_3(u, v) = E_2(u, v)\phi, \quad (6)$$

由傅里叶变换计算得图像传感器位置处的光场为

$$E_4(x, y) = \frac{1}{\lambda f_2} \mathcal{F}[E_3(u, v)], \quad (7)$$

由此可计算得到图像传感器采集的强度为

$$I_{\text{CCD}} = |E_4(x, y)|^2. \quad (8)$$

2.2 算法原理

Py-GS 的相位恢复算法基于四棱锥传感器的光场传输模型设计,光场在入瞳面和图像传感器面两个面之间正向和逆向传播,将瞳面和探测器面的光强作为约束条件,通过迭代优化得到所需波前信息。算法流程如图 2 所示,循环从一个估计的初始复振幅 $E_1^{(k)}(\xi, \eta)$ 开始,设置入射瞳面处初始振幅值 $\sqrt{I_{\text{pupil}}}$ 均匀,其数值由图像传感器获得光强分布的总能量求得,初始相位值设为零,迭代的关键步骤为:1)对瞳面复振幅进行傅里叶变换,经四棱锥的相位延迟作用后再次进行傅里叶变换,得到探测器平面光场复振幅 $E_4^{(k)}(x, y)$;2)用探测器采集强度 I_{CCD} 的平方根 $\sqrt{I_{\text{CCD}}}$ 作为振幅约束条件代替计算所得振幅;3)对步骤 2)得到的重组复振幅 $E_1^{(k)}(\xi, \eta) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}^{-1}[E_4^{(k)}(u, v)]\phi^{-1}\}$ 逆向计算至瞳面处,得到瞳面平面的光场;4)进行迭代停止条件判断,若满足迭代停止条件则结束循环并输出相位结果,若不满足迭代停止条件则对新得到的输入相位施加均

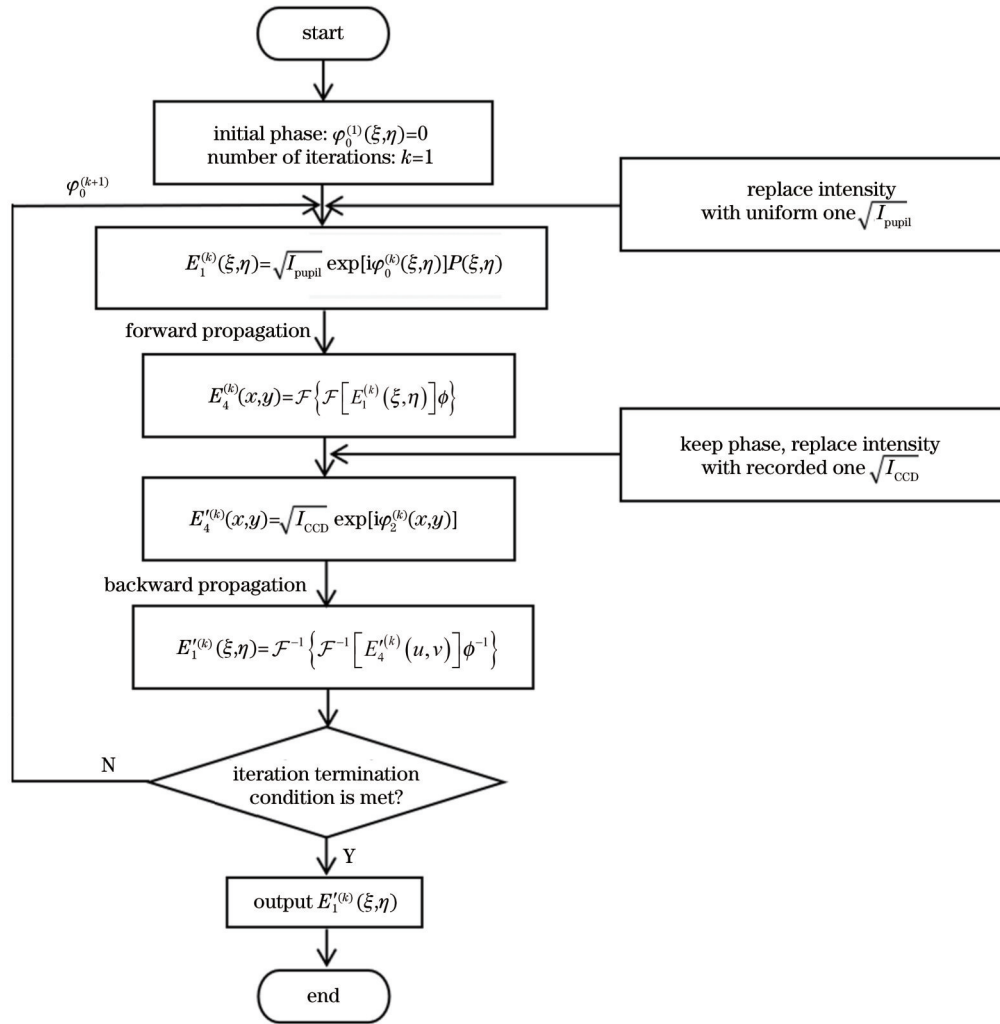


图 2 Py-GS 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of Py-GS algorithm

匀振幅 $\sqrt{I_{\text{pupil}}}$ 的约束,再次进行循环迭代,当迭代次数 k 达到设置次数上限时终止迭代。

本文采用探测器面的计算强度图与记录强度图差值的归一化均方根(RMS)作为评价函数,评估迭代结果是否满足要求,其表达式为

$$f_e^{(k)} = \sqrt{\frac{\sum_{x,y} |I_k(x,y) - I_{\text{CCD}}(x,y)|^2}{\sum_{x,y} |I_{\text{CCD}}(x,y)|^2}}, \quad (9)$$

式中: I_k 为当前计算所得探测器的光强度分布; I_{CCD} 为探测器采集获得的光强度; (x,y) 为像素坐标。当评价函数值小于预设值时,认为迭代可以停止,此时,退出迭代,输出相位恢复结果。

3 数值仿真

3.1 仿真设置

为验证 Py-GS 性能,本文对图 1 中光路进行数值仿真,并进行一系列波前传感模拟实验。仿真实验参数设置如下:光源采用波长 $\lambda=632.8 \text{ nm}$ 的激光;前置透镜直径 $D_1=15 \text{ mm}$,焦距 $f_1=500 \text{ mm}$,中继透镜直

径 $D_2=25.4 \text{ mm}$,焦距 $f_2=500 \text{ mm}$;被测相位所在瞳面的通光半径 $R=6.35 \text{ mm}$;四棱锥底角 $\alpha=3.6^\circ$,折射率 $n=1.7$;图像传感器靶面采样数为 512×512 ,像素大小为 $5.9 \mu\text{m}$;算法迭代终止次数为 500,迭代终止条件为评价函数 f_e 的值小于 1×10^{-3} 。

图 3 为 Py-GS 探测器采集到的强度分布仿真图,其中,图 3(a)为瞳面无附加相位时的强度分布,图 3(b)为瞳面引入离焦像差时的探测器强度分布。

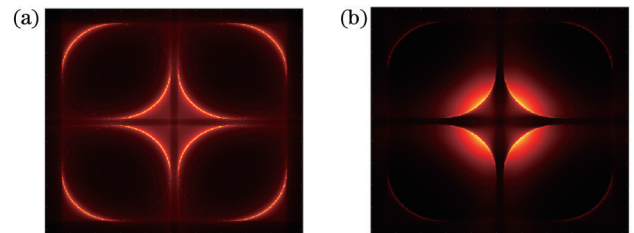


图 3 Py-GS 探测器的强度分布仿真图。(a)无波前像差; (b)离焦

Fig. 3 Simulation images of intensity distribution of Py-GS detector. (a) No wavefront aberration; (b) defocus aberration

3.2 波前传感仿真

首先考察 Py-GS 对随机组合像差的重建情况。实验采用 Zernike 多项式前 15 项随机生成的组合像差作为待测波前,如图 4(a)所示,被测波前的 RMS 为

0.030λ ,峰谷(PV)值为 0.390λ ,重建结果如图 4(b)所示,图 4(c)为重建相位残差,其 RMS 值为 0.001λ ,PV 值为 0.002λ 。图 4(d)为评价函数曲线,迭代 14 次后达到收敛。

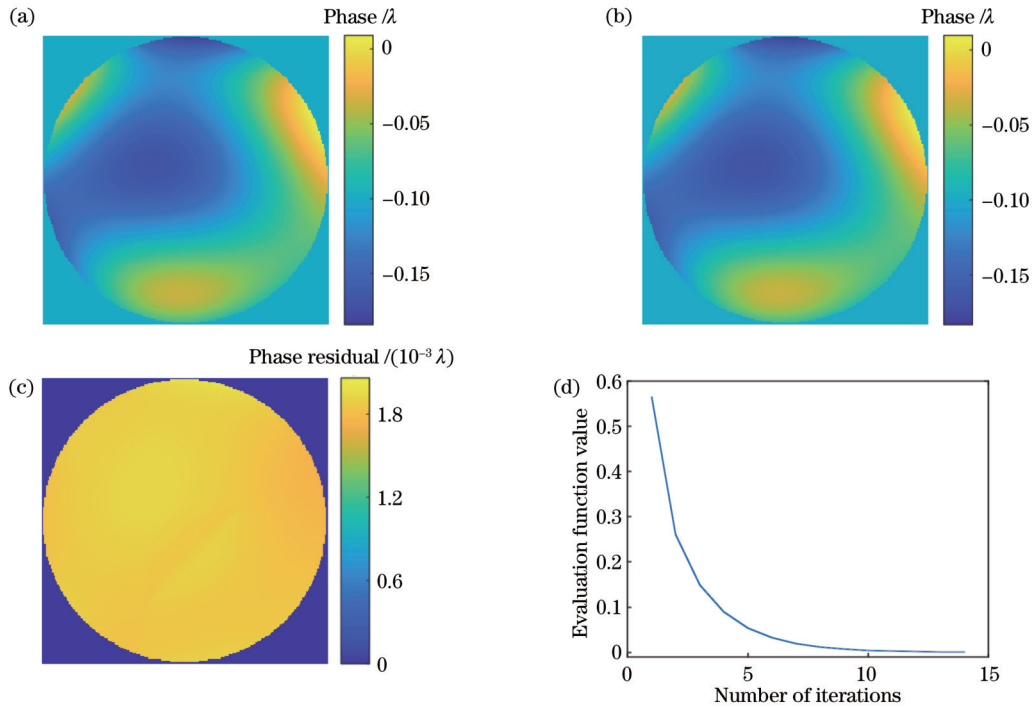


图 4 随机组合像差重建结果。(a)输入相位;(b)恢复相位;(c)相位残差;(d)评价函数曲线

Fig. 4 Reconstruction results of random combination aberration. (a) Input phase; (b) reconstructed phase; (c) phase residual; (d) curve of evaluation function

为验证 Py-GS 的实用性,考察对符合 Kolmogorov 谱的大气随机相位的重建情况。图 5(a)为被测大气相位,其 RMS 值为 0.0300λ ,PV 值为 0.3700λ ,重建结果如图 5(b)所示,图 5(c)为重建相位残差,其 RMS 值为 0.0008λ ,PV 值为 0.0070λ 。图 5(d)为评价函数曲线,迭代 11 次后达到收敛。

考察 Py-GS 对大幅值相位的检测能力,以幅值超过 2λ 的自由曲面作为被测波前。图 6(a)为输入相位,其 RMS 值为 0.1200λ ,PV 值为 2.3300λ ,重建结果如图 6(b)所示,图 6(c)为解包裹后的重建相位残差,其 RMS 值为 0.0001λ ,PV 值为 0.0020λ 。图 6(d)为评价函数曲线,迭代 29 次后达到收敛。

上述 3 组仿真的结果表明:无论是对于复杂的组合像差相位、有实际检测需要的大气随机相位,还是大幅值相位,Py-GS 均能够快速、精确地重构被测波前,可见其具备良好的波前传感能力。

4 分析与讨论

4.1 算法收敛性

为检验 Py-GS 算法的收敛性能,将 Py-GS 算法与经典 GS (Con-GS) 算法进行对比。其中,Con-GS 算

法在图 1 所示的光路瞳面与四棱锥锥尖所在焦面之间进行优化迭代。两种算法的仿真方法与参数设置与 3.1 节相同。

为探究 Py-GS 算法在不同幅值待测波前下的收敛性能,以第 3.2 节中大气相位为例,改变大气相位的幅值,令其 PV 值分别为 0.5λ 、 1.0λ 、 1.5λ 、 2.0λ 和 2.5λ ,分别使用 Py-GS 和 Con-GS 算法对这些待测波前进行重建。图 7 给出了两种算法的评价函数曲线,可以看出:随着被测波前幅值的增加,两种算法的收敛速度均有所减慢。图 7(a)为 Py-GS 算法对上述不同幅值波前重建的评价函数曲线,分别迭代 8、30、47、155、347 次时,评价函数值达到迭代终止条件,当待测波前幅值为 1.5λ 、 2.0λ 和 2.5λ 时,迭代次数超过 100 次。对于 Con-GS 算法,如图 7(b)所示,不同幅值待测波前对应的迭代次数分别为 218、424、500、500、500 次,当待测波前幅值为 1.5λ 、 2.0λ 和 2.5λ 时,评价函数值分别为 0.11、0.22、0.25,即在达到预设迭代次数时仍未满足收敛条件,且从评价函数曲线可看出 Con-GS 算法在迭代早期有平台期。由此可见,随着被测波前幅值的增大,相较于经典 GS 算法,Py-GS 算法在收敛速度方面更具有优势。

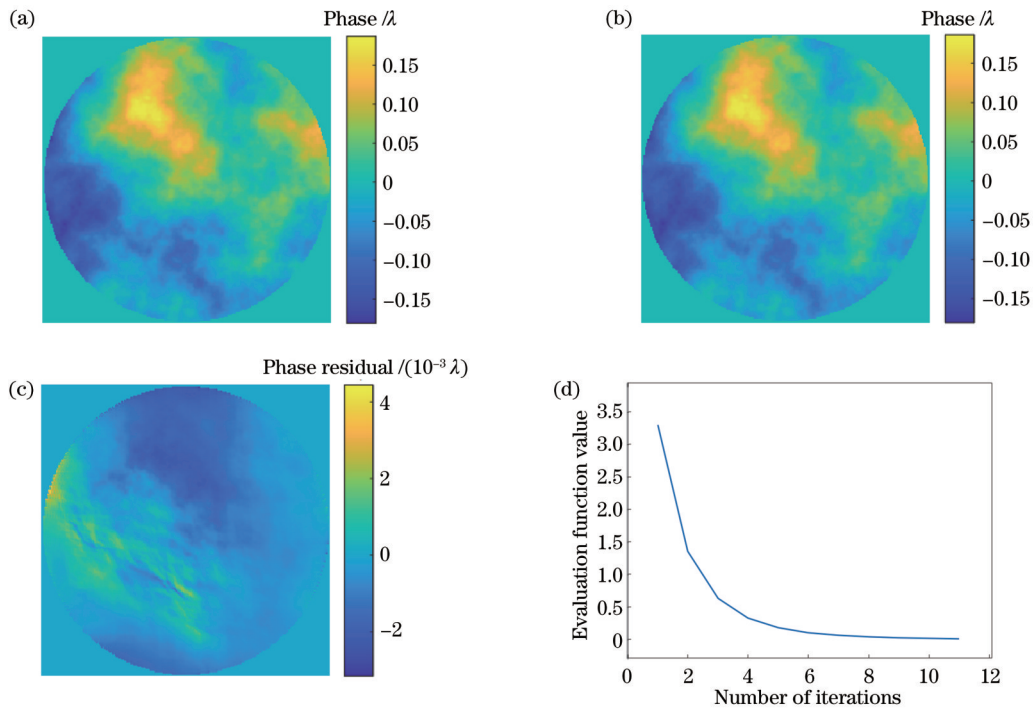


图 5 大气湍流随机相位的重建结果。(a)输入相位;(b)恢复相位;(c)相位残差;(d)评价函数曲线

Fig. 5 Reconstruction results of random phase of atmosphere turbulence. (a) Input phase; (b) reconstructed phase; (c) phase residual; (d) curve of evaluation function

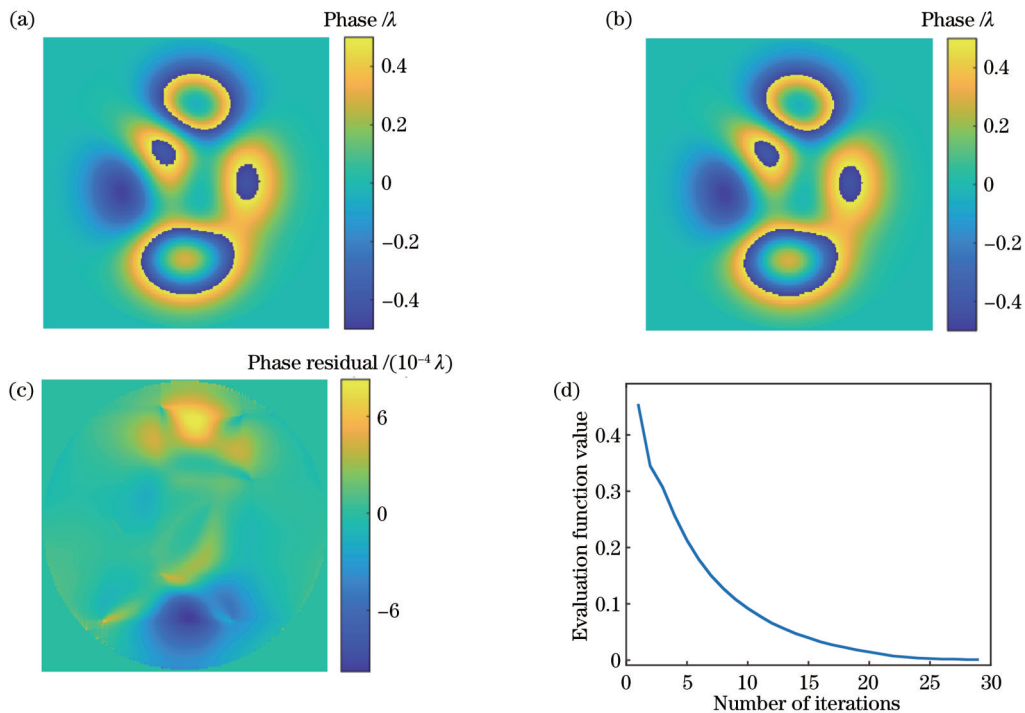


图 6 自由曲面相位的重建结果。(a)输入相位;(b)恢复相位;(c)相位残差;(d)评价函数曲线

Fig. 6 Reconstruction results of phase of freeform surface. (a) Input phase; (b) reconstructed phase; (c) phase residual; (d) curve of evaluation function

4.2 动态范围

为分析 Py-GS 的动态范围,本文采用在离焦相位上叠加不同程度的倾斜相位来模拟被测波前幅值较大使四棱锥锥尖处的光斑产生不同程度偏移的情况,以

此来分析当被测波前超过传统四棱锥传感器动态范围时的 Py-GS 工作性能。如图 8(a)、(d)所示,当无被测相位时,四棱锥锥尖处的光斑被四棱锥锥尖四等分,在探测器面上形成 4 个对称的子光瞳像。当存在较大程

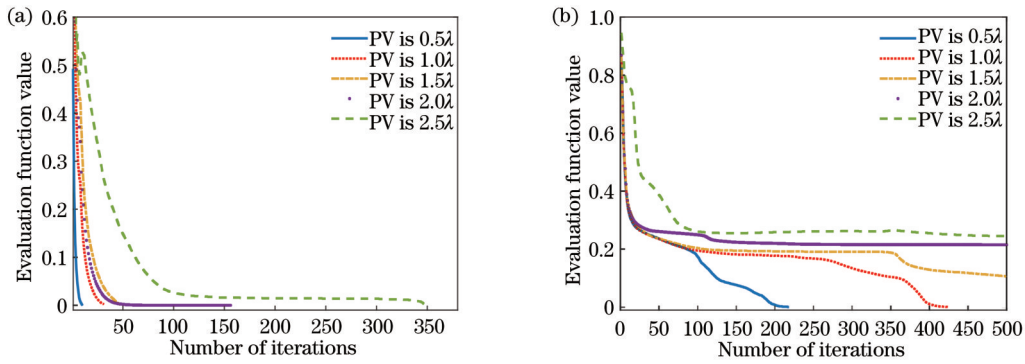


图 7 不同幅值被测波前下两种算法的评价函数曲线。(a) Py-GS算法;(b) Con-GS算法

Fig. 7 Curves of evaluation function of two algorithms for measured wavefronts with different amplitudes. (a) Py-GS algorithm; (b) Con-GS algorithm

度倾斜时,例如分别引入PV值为 1.5λ 和 3.0λ 的水平方向倾斜,四棱锥锥尖处光斑如图8(b)、(c)所示,探测器面强度分布如图8(e)、(f)所示,此时光斑逐渐偏

离四棱锥锥尖,造成探测器左侧两个子光瞳像强度逐渐变弱,与被测相位超出传统四棱锥波前传感器动态范围的情况类似。

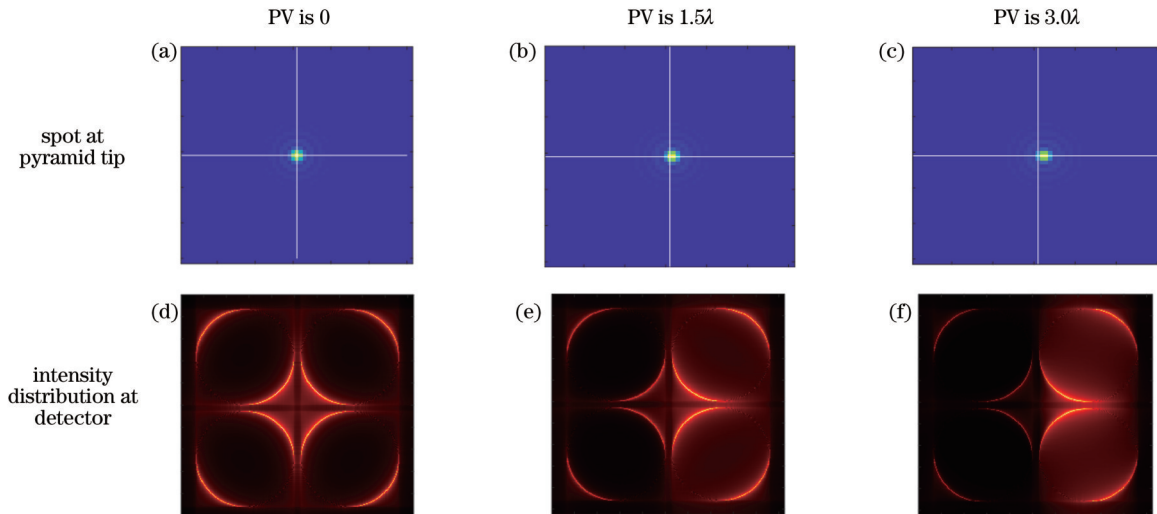


图 8 不同倾斜程度下的四棱锥锥尖处的光斑和探测器强度分布图。(a)~(c)不同倾斜程度下的锥尖光斑;(d)~(f)不同倾斜程度下的探测器强度分布

Fig. 8 Spots at pyramid tip and intensity distributions of detector under different tilt angles. (a)~(c) Spots at pyramid tip under different tilt angles; (d)~(f) intensity distributions on detector under different tilt angles

对于传统四棱锥波前传感器,当四棱锥锥尖处的光斑偏离较大,探测器上4个子光瞳像因光线不足存在部分暗淡斑时,基于子光瞳像计算波前斜率的四棱锥波前传感器波前的重建算法失效。图9分析了使用经典四棱锥波前重建算法处理叠加不同水平倾斜相位的离焦像差时的情况。此处使用的离焦像差PV值为 1.51λ ,RMS为 0.38λ ,水平倾斜相位的PV值分别为 0 、 1.5λ 和 3.0λ ,产生的复合被测相位如图9(a)~(c)所示。当仅存在离焦像差时,传统四棱锥传感器计算出的水平波前斜率及其横截面剖线图如图9(g)、(j)所示,因该离焦幅值较大,部分区域超出传统四棱锥传感器的线性区间,此时传统四棱锥传感器已不能定量重建整个波前。当存在较大程度倾斜时,如图9(b)、

(c)、(e)、(f)、(h)、(i)、(k)、(l)所示,此时探测器左侧两个子光瞳像信息丢失,由于子光瞳像计算得到的水平方向波前斜率与被测波前斜率之间的对应关系进一步被破坏,基于此重建的波前将有错误,即四棱锥波前传感器经典重建算法失效。

对于图9(a)~(c)所示的被测相位,Py-GS传感器能够在不事先校正倾斜的情况下,重建出含倾斜的复合相位,结果如表1所示,重建残差的RMS值分别为 $1.23 \times 10^{-4}\lambda$ 、 $2.23 \times 10^{-4}\lambda$ 和 $5.88 \times 10^{-4}\lambda$,PV值分别为 0.002λ 、 0.004λ 和 0.030λ 。上述结果表明,Py-GS传感器无需调制便能以较大动态范围工作。

4.3 抗噪性

Py-GS中四棱锥的分光对探测器获得图像的信噪

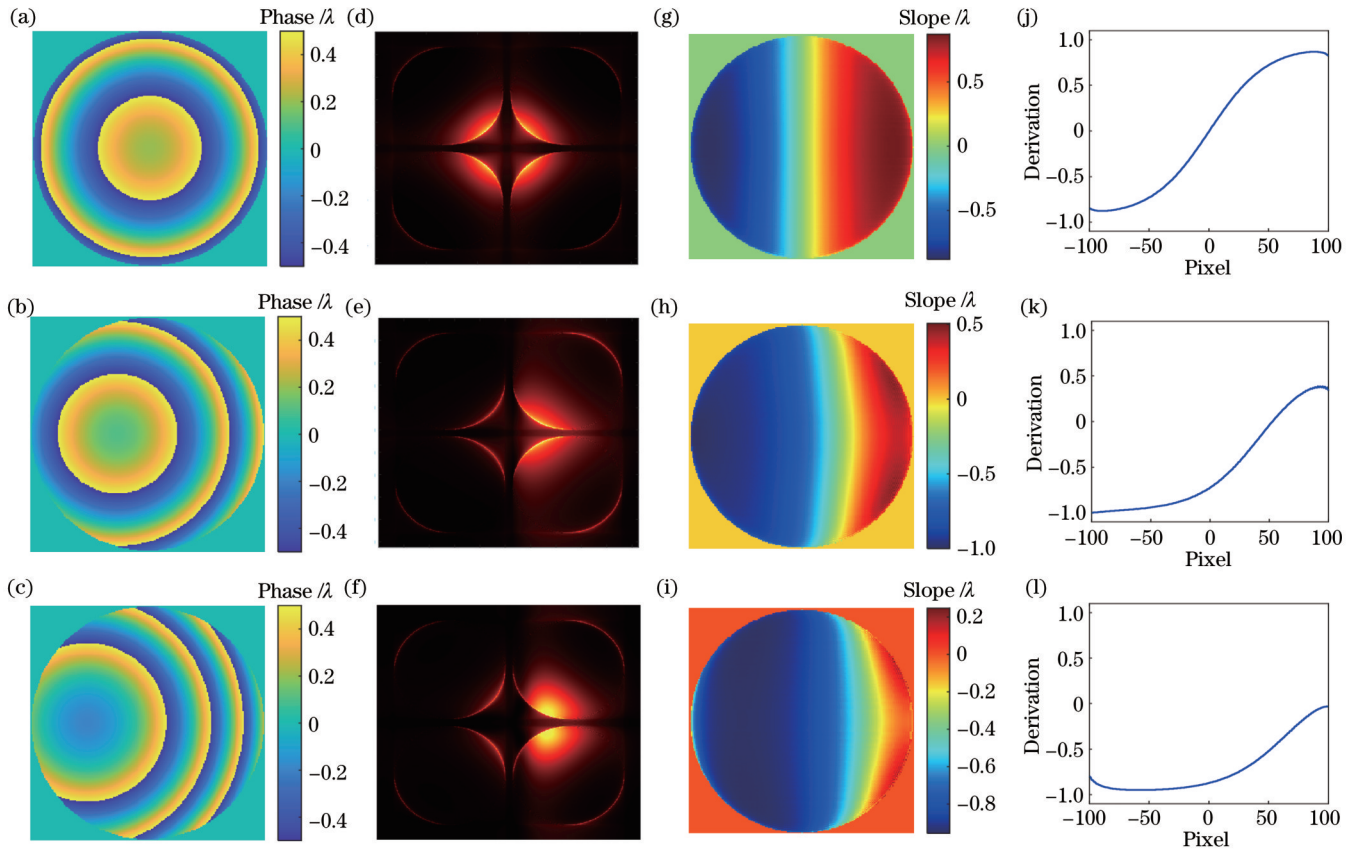


图 9 不同复合被测相位下经典四棱锥波前重建算法结果。(a)~(c)被测相位;(d)~(f)探测器强度分布;(g)~(i)水平方向波前斜率图;(j)~(l)水平方向波前斜率横截面图

Fig. 9 Results of conventional pyramid wavefront reconstruction algorithm for different composite phases to be measured. (a)~(c) Phases to be measured; (d)~(f) intensity distributions of detector; (g)~(i) slopes of horizontal wavefront; (j)~(l) cross sections of slopes of horizontal wavefront

表 1 Py-GS 对图 9 中复合被测波前的重建结果

Table 1 Reconstruction results of composite wavefronts to be measured in Fig. 9 obtained by Py-GS

Tilt of wavefront to be measured	Defocus of wavefront to be measured	RMS of reconstructed residual	PV of residual
0	1.51λ	$1.23 \times 10^{-4}\lambda$	0.002λ
1.5λ	1.51λ	$2.23 \times 10^{-4}\lambda$	0.004λ
3.0λ	1.51λ	$5.88 \times 10^{-4}\lambda$	0.030λ

比(SNR)有所影响,而且当目标光强不同、探测器底噪不同或者受环境等因素影响时,探测器获得图像的信噪比也会有差异。本节考察不同图像信噪比对Py-GS传感器性能的影响。被测波前采用3.2节图5所示的大气波前,在探测器图像上分别加入信噪比为5 dB、10 dB和20 dB的高斯噪声,得到的探测器图像如图10(a)~(c)所示。图10(d)~(i)和表2为Py-GS在这三种情况下的波前重建结果。

图10展示了信噪比分别为5 dB、10 dB、20 dB的条件下Py-GS传感器波前重建的结果。图10(a)~(c)为加入不同噪声下的探测器强度图,图10(d)~(f)为对应的波前重建结果图,图10(g)~(i)为波前重建残差。与图5中Py-GS重建结果相比,当存在噪声时,重建残差

有所增大,且重建残差随噪声的增大而增大。如表2所示,当信噪比为5 dB、10 dB、20 dB时,重建结果的均方根误差分别为 $3.39 \times 10^{-2}\lambda$ 、 $1.75 \times 10^{-2}\lambda$ 、 $5.29 \times 10^{-3}\lambda$,在噪声较大情况下仍优于 $(1/25)\lambda$,重建精度较高。由此可见,噪声虽然对Py-GS性能有一定的影响,但仍具有实际使用价值。

4.4 四棱锥加工误差的影响

受加工工艺的限制,实际的四棱锥顶点处并不是理想的锥尖,而是退化成一个平台,该平台的存在会影响四棱锥的分光,使探测器上获得的光强分布与理论分布略有差异。本节讨论这种加工误差对Py-GS波前探测性能的影响。

目前,国内外四棱锥锥尖平台的加工精度约为

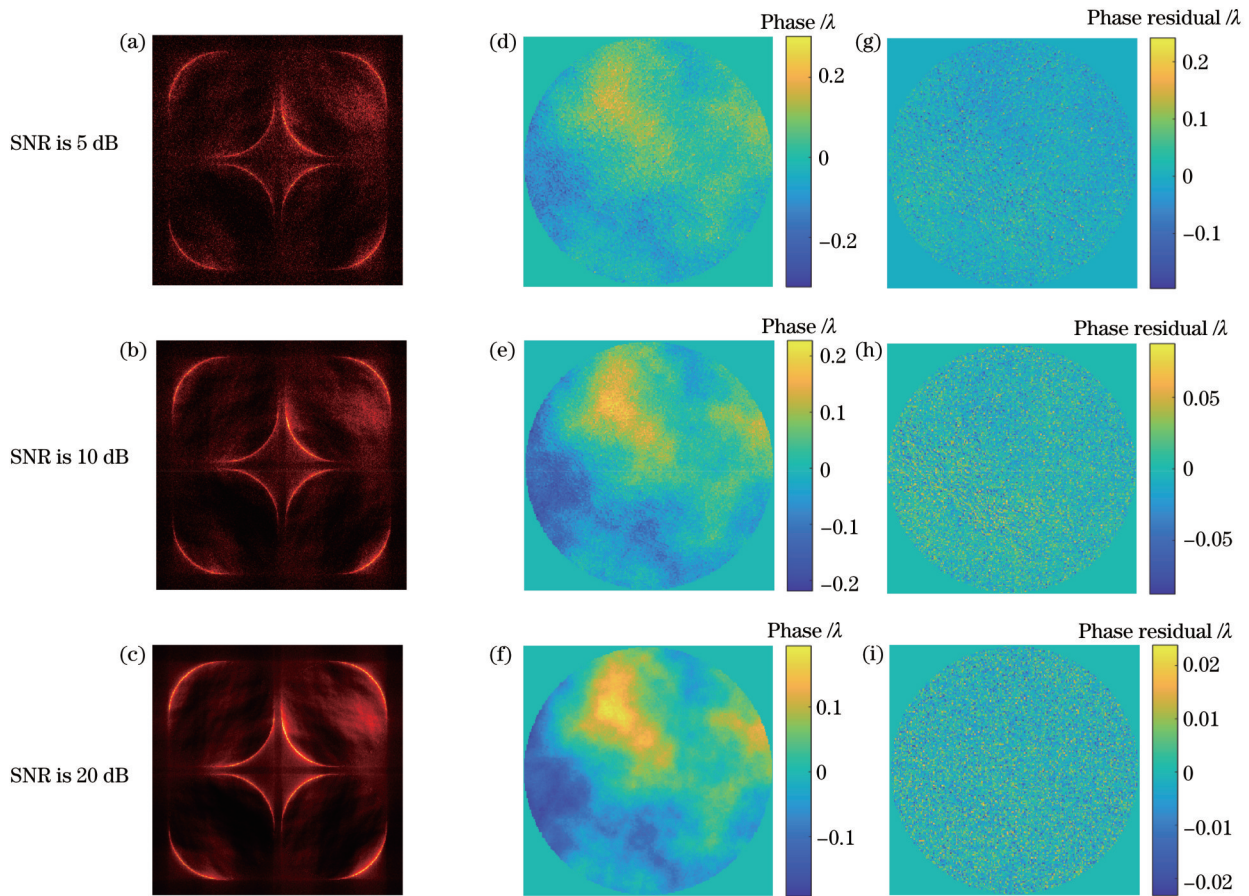


图 10 不同信噪比条件下 Py-GS 的波前重建结果。(a)~(c)探测器强度分布;(d)~(f)重建波前;(g)~(i)残差
Fig. 10 Reconstruction results of wavefront obtained by Py-GS under different SNR conditions. (a)~(c) Intensity distributions on detector; (d)~(f) reconstructed wavefronts; (g)~(i) residuals

表 2 不同信噪比情况下 Py-GS 的重建残差 RMS
Table 2 RMS of reconstructed residual of Py-GS under different SNR conditions

SNR /dB	RMS / λ
5	3.39×10^{-2}
10	1.75×10^{-2}
20	5.29×10^{-3}

$10 \mu\text{m}$ ^[27-29], 对于本文 3.1 节的仿真系统, 该尺寸约占四棱锥前系统艾里斑尺寸的 20%。为了探究四棱锥锥尖平台对 Py-GS 波前探测的影响, 本节仿真探测器上获得的强度图时, 将四棱锥锥尖设置为尺寸为 $6 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 和 $14 \mu\text{m}$ 的平台, 分别对应的四棱锥前系统艾里斑尺寸比值为 0.12、0.20 和 0.28 的情况, 然后将幅值为 $0.1\lambda \sim 0.9\lambda$ 的 Zernike 多项式前 15 项随机生成的组合波前作为被测波前, 生成相应的探测器强度图, 最后用基于理想四棱锥面形建模的 Py-GS 算法进行相位恢复。

波前探测结果如图 11 所示: 当平台尺寸为 0.12 和 0.20 个四棱锥前系统艾里斑尺寸时, 对于不同幅值的被测波前, Py-GS 重建残差 RMS 值都在 0.01λ 以下, PV 值都在 0.20λ 以下; 当平台尺寸为 0.28 个四棱锥前

系统艾里斑尺寸时, 在输入波前 PV 值大于 0.20λ 的情况下, 重建残差 RMS 值超过 0.10λ , PV 值超过 0.80λ 。可见, 四棱锥锥尖中央平台的存在对 Py-GS 方法的重建精度有所影响, 但在当前四棱锥的加工精度水平下, 平台尺寸对应锥前系统艾里斑尺寸的 20% 时, Py-GS 仍具有实际使用价值。在实际使用时, 若要达到较高重建精度, 平台尺寸应当尽量小于锥前系统艾里斑尺寸的 20%。在四棱锥加工精度较低的情况下, 可以通过增大四棱锥前系统艾里斑尺寸来减小四棱锥中央平台对 Py-GS 方法的影响, 或者对四棱锥面形进行高精度测量, 将含有平台的四棱锥面形代入 Py-GS 相位恢复算法, 克服四棱锥中央平台对 Py-GS 方法的影响。

5 结 论

提出一种基于相位恢复算法的无调制四棱锥波前传感器 Py-GS, 该传感器利用四棱锥的分光特性获得包含被测波前信息的子光瞳像, 根据四棱锥波前传感器的光场传播模型优化迭代出待测波前。仿真结果表明: 相较于经典 GS 算法, Py-GS 算法的重建结果准确、收敛速度更快; 相较于经典四棱锥波前传感器, Py-GS 传感器无需调制便可以获得较大的动态范围; 在有

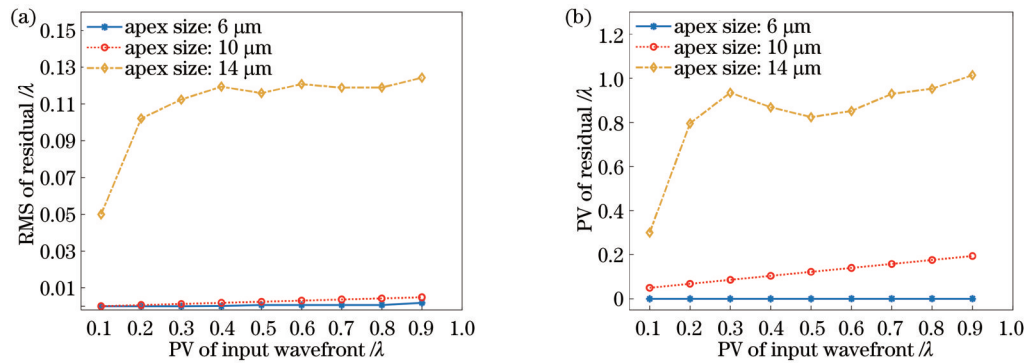


图 11 中央平台对重建结果的影响。(a)不同平台尺寸下的重建残差RMS值;(b)不同平台尺寸下的重建残差PV值
Fig. 11 Influence of central platform on reconstruction results. (a) RMS of reconstructed residual under different size of central platform; (b) PV of reconstructed residual under different size of central platform

噪声的情况,Py-GS仍具有实用性能;当四棱锥中央平台较小时,Py-GS仍能以较高精度重建波前。随着计算平台的速度提升与四棱锥加工工艺的日益改善,Py-GS有望成为一种实用的波前传感器,服务于天文和生物医学等领域的自适应光学系统。

参 考 文 献

- [1] Babcock H W. The possibility of compensating astronomical seeing[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1953, 65: 229.
- [2] 陈欣欣, 苑克娥, 时东锋, 等. 大气湍流对空基光学成像系统影响的仿真研究[J]. 光学学报, 2022, 42(18): 1801002.
Chen X X, Yuan K E, Shi D F, et al. Simulation study on the effect of atmospheric turbulence on space-based optical imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(18): 1801002.
- [3] 孟章, 丁浩, 裴守平, 等. 深度学习在数字全息显微成像中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(18): 1811006.
Meng Z, Ding H, Nie S P, et al. Application of deep learning in digital holographic microscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(18): 1811006.
- [4] 季颖, 傅爽, 陶兆禾, 等. 整合光散射信息的生物细胞相位成像系统[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(9): 091701.
Ji Y, Fu S, Tao Z H, et al. Biological cell phase imaging system integrated with optical scattering information[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(9): 091701.
- [5] 宋静威, 李常伟, 张思炯. 基于离焦型夏克-哈特曼传感器的定量相位成像技术[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0911002.
Song J W, Li C W, Zhang S J. Quantitative phase imaging based on defocused Shack-Hartmann sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0911002.
- [6] 陈欣扬, 朱能鸿. 基于四棱锥传感器的波前检测仿真设计[J]. 天文学进展, 2006, 24(4): 362-372.
Chen X Y, Zhu N H. The design of software simulation based on pyramid wavefront sensor[J]. Progress in Astronomy, 2006, 24(4): 362-372.
- [7] Ragazzoni R. Pupil plane wavefront sensing with an oscillating prism[J]. Journal of Modern Optics, 1996, 43(2): 289-293.
- [8] 张彦夫. 四棱锥波前传感技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014: 20-28.
Zhang Y F. Study in pyramid wave-front sensor technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 20-28.
- [9] Bond C Z, Cetre S, Liley S, et al. Adaptive optics with an infrared pyramid wavefront sensor at Keck[J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2020, 6(3): 039003.
- [10] Bertrou C A, Gendron E, Rousset G, et al. Confusion in differential piston measurement with the pyramid wavefront sensor[J]. Astronomy & Astrophysics, 2022, 658: 1-16.
- [11] 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.
Zhu N H, Chen X Y, Zhou D, et al. Study on measuring piston error of segmented mirror using pyramid sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(3): 433-437.
- [12] 颜召军, 郑立新, 王超燕, 等. 四棱锥传感器在空间光干涉望远共相中的应用[J]. 光子学报, 2018, 47(11): 1128002.
Yan Z J, Zheng L X, Wang C Y, et al. Application of pyramid sensor for co-phasing space optical interferometric telescope[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(11): 1128002.
- [13] Iglesias I. Pyramid phase microscopy[J]. Optics Letters, 2011, 36(18): 3636-3638.
- [14] Brunner E, Shatokhina J, Shirazi M F, et al. Retinal adaptive optics imaging with a pyramid wavefront sensor[J]. Biomedical Optics Express, 2021, 12(10): 5969-5990.
- [15] Brunner E, Shatokhina J, Shirazi M F, et al. AO-OCT imaging of the retina with a pyramid wavefront sensor[J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 2021, 62(8): 23.
- [16] Esposito S, Riccardi A. Pyramid Wavefront Sensor behavior in partial correction Adaptive Optic systems[J]. Astronomy and Astrophysics, 2001, 369(2): L9-L12.
- [17] Ragazzoni R, Diolaiti E, Vernet E. A pyramid wavefront sensor with no dynamic modulation[J]. Optics Communications, 2002, 208(1/2/3): 51-60.
- [18] Costa J B, Ragazzoni R, Ghedina A, et al. Is there need of any modulation in the pyramid wavefront sensor? [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4839: 288-298.
- [19] Costa J B. Modulation effect of the atmosphere in a pyramid wave-front sensor[J]. Applied Optics, 2005, 44(1): 60-66.
- [20] Wang S Q, Rao C H, Xian H, et al. Laboratory demonstrations on a pyramid wavefront sensor without modulation for closed-loop adaptive optics system[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8135-8150.
- [21] Wang S Q, Wei K, Zheng W J. Modulation-nonmodulation pyramid wavefront sensor with direct gradient reconstruction algorithm on the closed-loop adaptive optics system[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 20952-20964.
- [22] Korkiakoski V, Verinaud C, Le Louarn M, et al. Comparison between a model-based and a conventional pyramid sensor reconstructor[J]. Applied Optics, 2007, 46(24): 6176-6184.
- [23] Gerchberg R W. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. Optik, 1972, 35: 237-246.
- [24] Clare R M, Lane R G. Phase retrieval from subdivision of the focal plane with a lenslet array[J]. Applied Optics, 2004, 43(20): 4080-4087.

- [25] Chambouleyron V, Fauvarque O, Potiron P J, et al. Pyramid wavefront sensor Optical Gains compensation using a convolutional model[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 644: A6.
- [26] Wang J X, Bai F Z, Ning Y, et al. Analysis on measured signal retrieval approaches in non-modulation pyramid wavefront sensor [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7853: 78533G.
- [27] Ragazzoni R, Ghedina A, Baruffolo A, et al. Testing the pyramid wavefront sensor on the sky[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4007: 423-430.
- [28] Tozzi A, Stefanini P, Pinna E, et al. The double pyramid wavefront sensor for LBT[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7015: 701558.
- [29] 黄麟舒. 自适应光学棱锥波前传感技术及其白天应用研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2022: 38.
- Huang L S. Research on the pyramid wavefront sensing approach for daylight adaptive optics[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022: 38.

Non-Modulation Pyramid Wavefront Sensor Based on Phase Retrieval

Wang Zhongqi^{1,2,3}, Lu Yanting^{1,2*}

¹*Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, Jiangsu, China;*

²*Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology (Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology), Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, Jiangsu, China;*

³*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract

Objective The pyramid wavefront sensor (PWFS) has been successfully applied to astronomical adaptive optics, mirror testing, and microscopy imaging due to its advantages of high energy utilization and spatial resolution. Modulation is often performed to expand the linear and dynamic ranges of the PWFS. Classical modulation methods include mechanical modulation, static modulation, and dynamic aberration modulation. Mechanical modulation involves the oscillation of the pyramid itself or a tip-tilt mirror at the entrance pupil of the system; static modulation adds a diffuser into the system; dynamic aberration modulation uses rapidly changing and undetectable aberrations as the signals to be modulated. However, the above methods all sacrifice the sensitivity of the PWFS for wider dynamic and linear ranges, which reduces the practicality of the PWFS. This paper proposes a novel non-modulation PWFS to expand the application of the PWFS in the field of phase detection. The proposed PWFS iteratively optimizes the wavefront to be measured with a phase retrieval algorithm based on a light-field propagation model of the PWFS. This PWFS based on phase retrieval has the features of high accuracy, fast convergence speed, and favorable noise immunity. Moreover, the proposed sensor covers a large dynamic range with no need for modulation.

Methods A PWFS with a $4f$ configuration is adopted, and a phase retrieval algorithm based on a light-field propagation model of the PWFS is designed to reconstruct the wavefront to be measured. Due to the beam-splitting effect of the pyramid tip, four sub-images of the pupil are recorded by the detector of the PWFS. The whole image from the detector is used as one constraint on the phase retrieval algorithm, while the assumed uniform intensity on the pupil plane serves as the other constraint. Owing to the abundant information provided by this detector image, the phase retrieval algorithm in the proposed sensor usually converges quickly. A series of simulation experiments are performed to evaluate the performance of the proposed sensor. Firstly, three different kinds of wavefronts, including a complex randomly combined aberration, a random phase of atmospheric turbulence, and a freeform surface with a large amplitude, are selected as the wavefronts to be measured to explore the generality of the proposed sensor. Secondly, convergence comparisons with the classical phase retrieval algorithm are conducted in the form of reconstruction experiments on wavefronts with different amplitudes. Thirdly, the dynamic range of the proposed sensor is investigated in a simulated scenario, in which the wavefronts to be measured exceed the dynamic range of the traditional PWFS. This experiment is also expected to verify the non-modulation property of the proposed sensor. Fourthly, the performance of the proposed sensor under different noise conditions is evaluated by inputting simulated detector images with different signal-to-noise ratios into its phase retrieval algorithm. Last but not least, a plateau always emerges at the tip of the pyramid due to limited processing technology. The impact of the central plateau on the pyramid on the performance of the proposed sensor is examined by using pyramids with different flat tips to simulate detector images and employing a phase retrieval algorithm based on the desired pyramid shape to reconstruct the wavefronts to be measured.

Results and Discussions As shown by the experimental results, the proposed sensor can quickly and accurately reconstruct different kinds of wavefronts with different amplitudes, indicating its favorable wavefront-sensing capability (Figs. 4–6). The results of convergence comparison experiments reveal that the convergence speed decreases as the amplitude of the wavefront to be measured increases. Nevertheless, the performance of the proposed sensor is always better than that of the classical phase retrieval algorithm (Fig. 7). The experimental results on the dynamic range show that the proposed PWFS based on phase retrieval performs still well when the amplitudes of the wavefronts to be measured are far beyond the dynamic range of the traditional PWFS. This indicates that the proposed sensor covers a large dynamic range with no need for modulation (Table 1). A slight degradation in the performance of the proposed sensor is observed when noise is present. According to the results, the root-mean-square error of the reconstruction results is smaller than $(1/25)\lambda$ even under heavy noise, representing high noise immunity of the proposed sensor (Table 2). In addition, when the size of the flat tip of the pyramid is smaller than 20% of the diameter of the system Airy disk in front of the pyramid, the proposed sensor remains practically useful (Fig. 11). The results of a series of numerical simulations show that the proposed PWFS based on phase retrieval has the features of high accuracy, fast convergence speed, high noise immunity, and large dynamic range with no need for modulation.

Conclusions This study proposes a non-modulation PWFS based on phase retrieval. The sensor avails the beam-splitting property of the pyramid to obtain four sub-images of the pupil, and these sub-images contain the information on the wavefront to be measured. Then, the wavefront to be measured is obtained by iterative optimization with the light-field propagation model of the PWFS. The simulation results show that the proposed phase retrieval algorithm based on the PWFS model is more accurate and converges faster than the classical phase retrieval algorithm. Compared with the traditional PWFS, the proposed sensor can obtain a larger dynamic range with no need for modulation. Its performance is still robust in the presence of noise. Wavefronts can be reconstructed with high accuracy when the central plateau on the pyramid tip is relatively small. As the computational platform and the pyramid processing technology further develop, the proposed sensor is expected to serve as a practical wavefront sensor for adaptive optical systems in the fields of astronomy and biomedicine.

Key words sensors; wavefront sensing; pyramid wavefront sensor; phase retrieval; adaptive optics