

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2018.04.015

基于遗传算法的相位差异技术图像恢复

刘鑫, 李大海

(四川大学电子信息学院, 成都 610065)

摘要: 相位差异技术利用焦面图像和固定离焦面图像信息, 联合估计波前相位和目标物体. 本文论述了相位差异技术的基本理论, 由于其评价函数变量多、非线性、无约束条件、计算量非常大的特点提出了将遗传算法运用于相位差异技术. 利用计算机开展了大量的模拟仿真实验, 仿真实验结果表明, 基于遗传算法的相位差异技术可以较准确地恢复光学系统的波前相位信息和目标物体. 设计了一个将相位差异技术运用于成像系统的传感器, 验证了相位差异技术提高图像清晰度和计算相位波前的能力.

关键词: 相位差异技术; 遗传算法; 波前相位; 目标物体

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2018)04-0745-07

Recovering image using a genetic algorithm based phase diversity technology

LIU Xin, LI Da-Hai

(College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Phase Diversity (PD) technology estimates both the wave-front phase and object by two focused and defocused images with known phase. The basic principles of wavefront sensing based on phase diversity method are expatiated, and the genetic algorithm is proposed in the data post-processing of phase diversity testing aiming at dealing with the multi variables, the highly nonlinearity, the Unconstrained condition and large amounts of calculation of merit function. Computer simulations are used to validate the algorithms and techniques, as the results show that this GA-based method can effectively recover wavefront phases and object. An image restoration and wave-front detection sensor by using PD technology was designed. The sensor shows that this Phase Diversity technology can improve image quality.

Keywords: Phase diversity technology; Genetic algorithm; Wavefront phases; Aim object

1 引言

光学系统传输媒介折射率不均匀、大气湍流、光学零部件表面误差、温度、湿度、应力变形等等原因的影响导致波前产生误差, 最终使得图像分辨率降低、清晰度下降. 在地面光学望远镜中, 由于大气扰动的动态干扰使得成像分辨率根本无法达到理

论衍射极限, 并且成像分辨率也不会随着望远镜口径的增加而提高, 这个因素严重制约着光学望远镜向大口径方向发展. 自适应光学技术是当前补偿或减少光学成像中波前畸变、大气湍流以及其他各种原因引起的光学成像系统波前相位畸变的有效方法之一. 自适应光学系统利用各种波前探测器动态的检测光瞳面相位畸变, 利用检测得到的数据驱动

收稿日期: 2017-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(61377018)

作者简介: 刘鑫(1990-), 男, 四川眉山人, 硕士生, 研究方向为光学波前检测. E-mail: 1174060529@qq.com

通讯作者: 李大海. E-mail: lidahai@scu.edu.cn

控制系统调整补偿装置实时地对光学系统进行补偿,从而达到减小甚至消除波前畸变对光学系统的影响,使得最终在光学系统焦平面得到接近理论衍射极限分辨率的图像。但是自适应光学系统结构复杂,需要光学、微电子、机械、软件等配合协同工作,成本高昂,并且自适应光学系统运行维护复杂,不灵活;而且其本身对光学系统畸变的矫正和补偿能力是有限的,即便矫正后也需要其他方法对图像进行再次处理。对图像的再次处理方法有很多,如散斑成像、盲解卷积、解卷积、相位差异(PD)技术等。相位差异技术作为一种事后处理技术,它利用在成像系统的焦面和离焦面分别拍摄一幅或者多幅图像,通过求解大规模无约束非线性多变量最优化函数得到位相信息,克服系统像差影响从而计算出接近衍射极限的图像或者对光学系统做出诊断。相位差异技术结构简单、成本低廉、容易实现、对目标物体没有任何要求,既可以求解出光学系统的相位信息,也可以恢复出目标物体;既可以代替自适应光学系统也可以做为一种自适应光学系统的补充,从而提高光学系统成像分辨率。

1979年 Gonsalves 和 Chidlaw 第一次提出了相位差异技术,基本思想是在成像系统的焦面和离焦面同时采集一对图像,迭代求解出相位信息和目标物体^[1]。Paxman 和 Fienup 将概率论的极大似然估计理论引入相位差异技术,并且推导出了基于高斯噪声和泊松噪声下的相位差异技术算法^[2]。Vogel 等人深入研究了相位差异技术的病态问题,引入了正则化优化算法,抑制了噪声放大并且提高了计算速度^[3]。Bolcar 和 Seldin 研究了宽光谱条件下的相位差异技术,将相位差异技术用于自然光条件下^[4]。

在实际应用中,相位差异技术也取得了一些成果。Meimon 引入已知像差,仅拍摄一幅焦面像便可求解光学系统相位畸变^[5]。Srge 将小像差条件下的 PD 引入夏科哈特曼探测器^[6]。Löfdahl 等人利用 SVST 望远镜观察太阳中使用相位差异技术进行图像复原,得到了太阳表面更清晰的图像^[7]。美国空军对相位差异技术大力资助,在夏威夷空军基地基于 1.6 m 口径望远镜利用相位差异技术进行实验。Bolcar 将相位差异技术用于拼接镜的检测中^[8]。北京理工大学将 PD 应用于大口径光学系统面型误差矫正,验证了该方法的有效性^[9];长春光机所研究人员将 PD 技术应用于望远镜探测和图像复原,静态光路自适应检测取得了良好的实验结

果^[10-13]。四川大学运用逐次逼近迭代法恢复了畸变波前高频相位^[14,15]。

本文在前人的研究基础上首先对相位差异技术的原理进行了描述,将遗传算法用于相位差异技术恢复图像的研究中,在计算机上模拟成像系统并计算光学系统的相位信息,用计算得到的相位信息恢复图像,给出了模拟计算的结果,并对结果进行了分析。

2 相位差异技术基本原理

如图 1 所示为相位差异技术原理图。此技术首先需要拍摄一幅由于光学系统或者其他未知原因引起质量变差的焦面图像,以及在同等条件下多幅不同已知离焦距离的图像,利用已有的固定离焦距离先验信息,计算出光学系统的波前相位信息,再利用计算出的波前相位信息恢复出目标物体形貌。拍摄离焦图像在原有光学系统基础上增加了分光镜以引入固定离焦距离。拍摄多幅不同离焦距离图像增加了先验信息,减小了随机误差,改善了求解最优化评价函数的病态性,提高了恢复目标物体的信噪比,可以取得比拍摄单幅离焦图像更满意的效果。

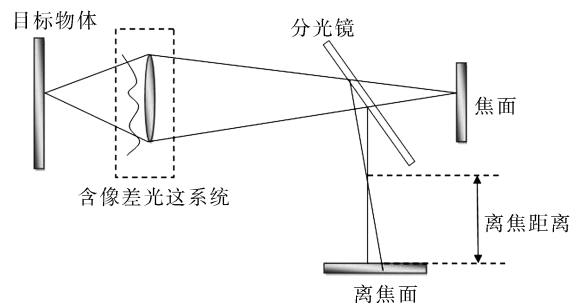


图 1 相位差异技术光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PD technology

在信息光学中,非相干线性空不变成像系统, CCD 或 CMOS 上采集到的图像是目标物体与强度脉冲响应的卷积,数学表达式为

$$i(x) = o(x) * h_1(x) + n(x) \quad (1)$$

式(1)中, * 表示卷积运算; (x) 表示像面坐标; $o(x)$ 表示目标物体的强度分布; $i(x)$ 表示 CCD 上采集的图像; $h_1(x)$ 表示强度脉冲响应; $n(x)$ 是高斯噪声。

强度脉冲响应用光瞳函数的傅里叶变换形式表示为

$$h_1(x) = |F^{-1}\{p(u)\exp(i\varphi(u))\}|^2 \quad (2)$$

由卷积定理和 Parseval 定理,等式(2)在频域

中表示为

$$I(u) = O(u)OTF(u) + N(u) \quad (3)$$

式(3)中, $I(u)$ 、 $O(u)$ 、 $OTF(u)$ 、 $N(u)$ 分别是 $i(x)$ 、 $o(x)$ 、 $h_1(x)$ 、 $n(x)$ 的傅里叶变换。

式(2)中, F^{-1} 是逆傅里叶变换; u 是出瞳平面坐标; p 是光瞳函数; φ 是相位信息, 可表示为 Zernike 多项式求和。

$$\varphi(u) = \theta(u) + \sum_m a_m z_m(u) \quad (4)$$

式(4)中, a_m 是第 m 项 Zernike 多项式的系数; z_m 是第 m 项 Zernike 多项式; $\theta(u)$ 是离焦相位信息。

$$\theta(u) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d_0}{8(F^\#)^2} (x^2 + y^2) \quad (5)$$

式(5)中 d_0 表示离焦距离。

p 是光瞳函数, 其数学表达式如下。

$$P = \begin{cases} 1, & \text{当 } \sqrt{x^2 + y^2} \leq D_0 \\ 0, & \text{当 } \sqrt{x^2 + y^2} > D_0 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中 D_0 表示光学系统光阑直径。

由于光学系统受到像差的影响, 将其引入到光瞳函数得到广义光瞳函数 \tilde{p} 。

$$\tilde{p} = p(u) \exp(i\varphi(u)) \quad (7)$$

又由于相干传递函数 H 等于广义光瞳函数 \tilde{p} , 故有

$$H = p(u) \exp(i\varphi(u)) \quad (8)$$

有像差系统的光学传递函数 OTF 等于相干传递函数 H 的自相关归一化, 如下所示。

$$OTF(u) = \frac{H(u) \star H(u)}{\int \int_{-\infty}^{+\infty} |H(u)|^2 du} \quad (9)$$

根据概率论中的极大似然估计理论, 用评价函数作为最优化的目标函数估计, 频域中表示为

$$L(O, a) = \frac{1}{2N} \sum_u \{ I_1(u) - O(u)OTF_1(u) + I_2(u) - O(u)OTF_2(u) \} \quad (10)$$

其中, N 为一幅图像的像素数; $I_1(u)$ 是焦面图像频域表示; $OTF_1(u)$ 是焦面图像光学传递函数; $I_2(u)$ 是离焦面图像的频域表示; $OTF_2(u)$ 是离焦面图像光学传递函数。

将约束最小二乘范式估计、有约束最小二乘估计、正则化技术等方法运用到相位差异技术中得到最简单的目标物体估计如下式

$$F(u) = \frac{I_1(u)OTF_1^*(u) + I_2(u)OTF_2^*(u)}{\gamma + |OTF_1(u)|^2 + |OTF_2(u)|^2} \quad (11)$$

其中, γ 是一个非负正则项系数, 近似为一个常数, 可解决计算过程中的病态问题。经过复杂的数学推导评价函数可以化简, 如下所示。

$$L(a) = \frac{1}{2N} \sum_u \left\{ |I_1(u)|^2 + |I_2(u)|^2 - \frac{|I_1(u)OTF_1^*(u) + I_2(u)OTF_2^*(u)|^2}{\gamma + |OTF_1(u)|^2 + |OTF_2(u)|^2} \right\} \quad (12)$$

相位差异技术的评价函数确定后, 相位波前求解和图像复原可以归结为: 让目标函数取得最小值的求解过程, 可以用计算得到的 Zernike 多项式系数恢复波前和目标物体。本文利用遗传算法对该问题进行了求解, 得到了很好的结果。

离焦距离与离焦相位 PV 值公式。

$$\Delta w = -\epsilon_z \frac{x^2 + y^2}{2R^2} = -\epsilon_z \frac{D_{EP}^2}{8R^2} = -\epsilon_z \frac{1}{8(F^\#)^2} \quad (13)$$

$$\epsilon_z = -8(F^\#)^2 \cdot \Delta w \quad (14)$$

其中, x, y 的为目标物体所在平面坐标; ϵ_z 是 CCD 离焦距离; R 是球面波曲率半径; f 是光学系统焦距; D_{EP} 是光学系统入瞳直径; Δw 是系统波前 PV 值, $F^\#$ 等于 f/D_{EP} 。取 Δw 等于一个波长, 离焦距离取 -0.0081 m 。

3 模拟计算

3.1 求解评价函数

评价函数是一个大规模无约束多变量非线性最优化数学表达式, 可用遗传算法进行求解。遗传算法是基于达尔文进化论提出的, 是一种模拟生物进化的概率随机方法。此算法从问题可能存在的一个种群开始计算, 每个种群都是由基因编码后的个体组成, 每一个个体都是含有染色体特点的实体。第一代种群产生后按照优胜劣汰、适者生存的原理, 一步步演化产生接近结果的近似解。在每一代中根据适应度挑选个体, 借助遗传算法的遗传算子进行选择、交叉、变异产生出新的种群。这种方法如同自然进化一样, 后代将比前一代更适应环境, 当满足停止条件后可结束计算给出近似结果。

3.2 模拟成像并计算 Zernike 多项式系数

模拟相机焦距 $f = 0.4 \text{ m}$, 光阑直径 $D = 0.01 \text{ m}$, 物面尺寸 $L_0 = 0.03 \text{ m}$, 物距 $d_0 = 4 \text{ m}$, 工作波长取 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 取 CCD 上 128×128 大小图像。在这里分别选择了矩孔和分辨率板作为目标物体进行模拟实验计算。图 2 描述了在光路中引入单

阶泽尼克多项式位相改变,拍摄得到焦面像,离焦像以及恢复像.图 3 描述了随机相位改变拍摄的离焦像,焦面像和恢复像.肉眼就很可以很看出恢复图像比焦面图像细节更明显、分辨率更高、层次更分明、条纹更清晰.表 1 算出了预设泽尼克系数与求解值之间的误差.进一步引入有参照质量评价方法均方误差(MSE),无参照质量评价方法拉普拉斯梯度模(LS)和能量斯特列尔比(SR)对焦面像、离焦像、恢复像进行评价,其数学公式为

$$f_{\text{MSE}} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i,j) - \bar{f}]^2}{M \times N} \quad (15)$$

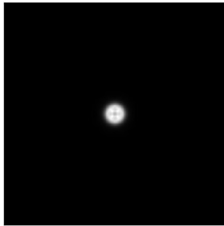
$$f_{\text{LS}} = \frac{\sum_{i=2}^{M-1} \sum_{j=2}^{N-1} \left| 9f(i,j) - \sum_{i=i-1}^{i+1} \sum_{j=j-1}^{j+1} f(i,j) \right|}{(M-2)(N-2)} \quad (16)$$

$$\text{sum}_1 = \sum f(x,y), \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \leq R_1$$

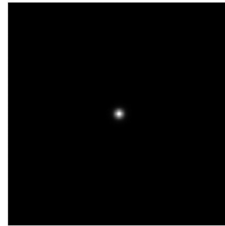
$$\text{sum}_2 = \sum f(x,y), \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \leq R_2$$

$$\text{SR} = \text{sum}_1 / \text{sum}_2 \quad (17)$$

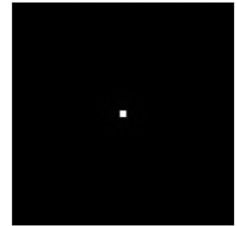
其中, M 和 N 是图像长和宽; $f(i,j)$ 是第 i 行、第 j 列像素图像灰度值,MSE越小说明与目标图像越接近,成像质量越好.LS值越大表明图像细节越丰富,成像质量越好.对于点目标物体或小矩孔的成像质量好坏常常用斯特列尔能量比来表示,点 (x_0, y_0) 表示图像最亮中心点,外环半径 R_2 可按衍射极限对应成像像素半径选择,内环半径 R_1 可以仅仅取 R_2 的几分之一,SR值越大表明能量约集中,成像质量越好.由表 2 可以看出计算机模拟恢复图像相比焦面图像 MSE、LS、SR 有很明显的进步.



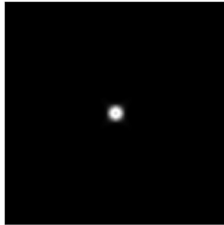
Z4焦面像



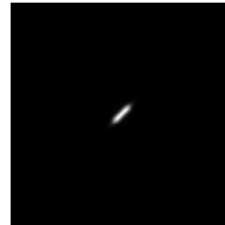
Z4离焦像



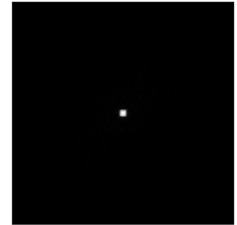
Z4恢复像



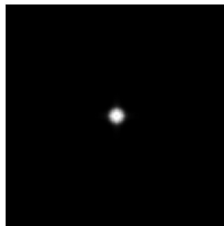
Z5焦面像



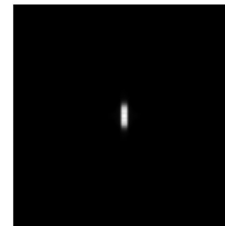
Z5离焦像



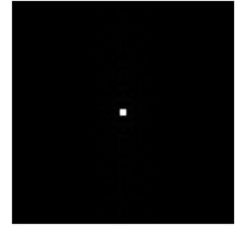
Z5恢复像



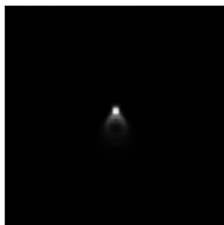
Z6焦面像



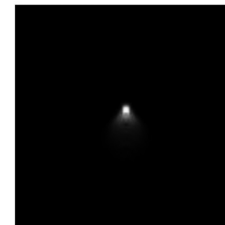
Z6离焦像



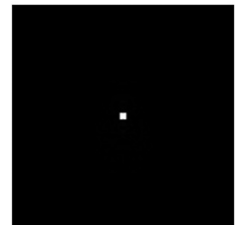
Z6恢复像



Z7焦面像



Z7离焦像



Z7恢复像

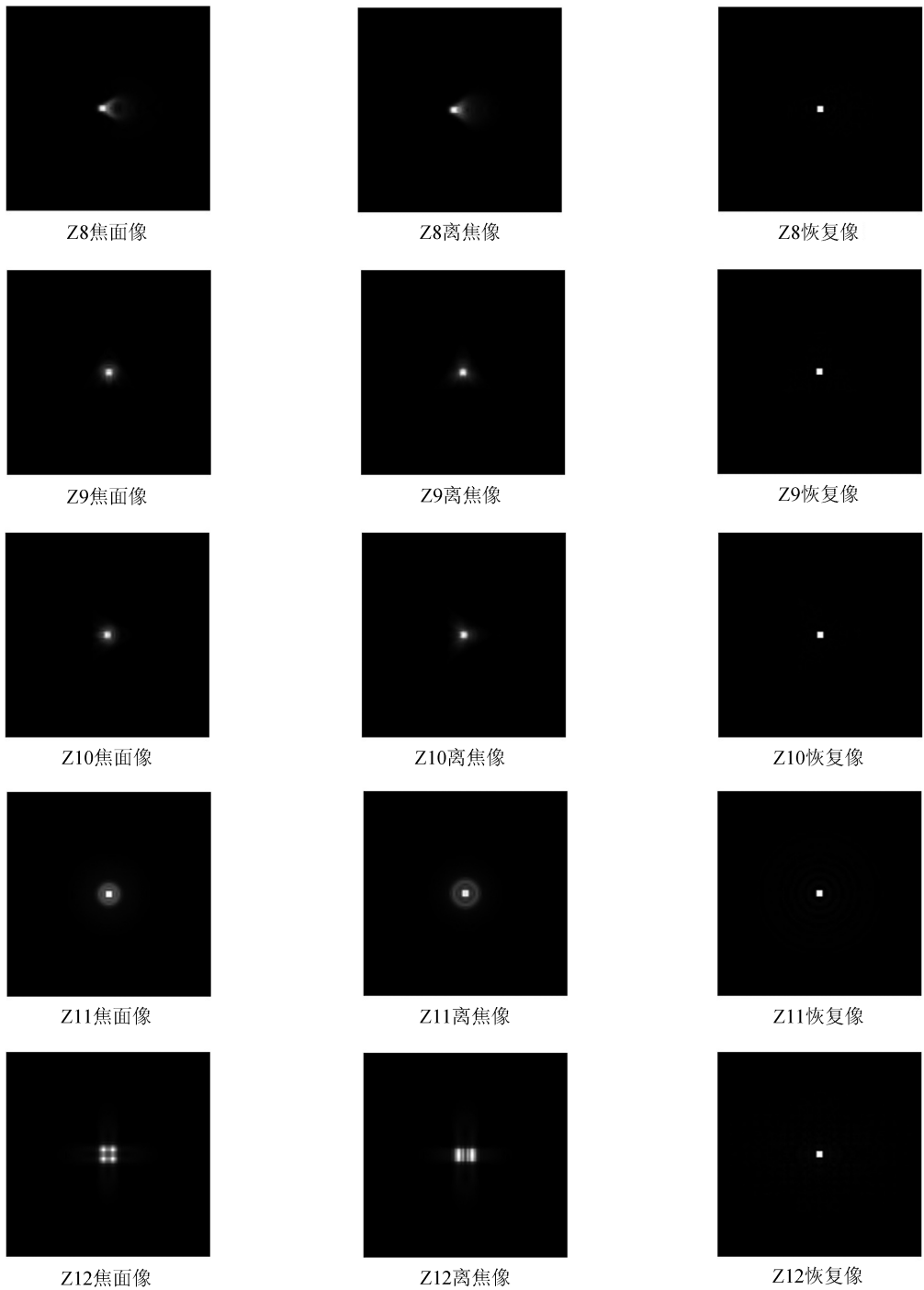


图 2 单阶 Zernike 相位改变, 采集的焦面像、离焦像以及恢复像

Fig. 2 Collected focus image, defocus image and restored images when One of the Zernike coefficients is changed

表 1 PD 计算的 Zernike 系数与预设值对比

Tab. 1 Comparison of Zernike coefficients by the value of PD technology and default

Zernike items	4	5	6	7	8	9	10	11	12
PD	-0.999	0.999	1.001	1.000	-1.001	1.001	1.000	1.000	1.000
default	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1
deviation	0.001	-0.001	0.001	0.000	-0.001	0.001	0.000	0.000	0.000

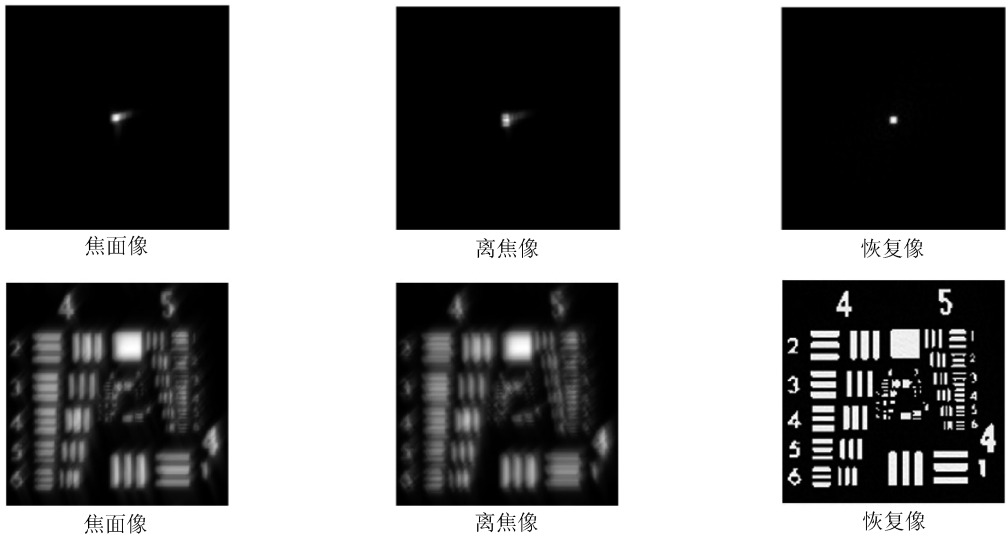


图 3 引入随机位相改变,计算得到的矩孔和分辨率版焦面像、离焦像、恢复像

Fig. 3 Collected focus image, defocus image and restored images of matrix aperture and resolution panel when phase is random

表 2 不同图像的 MSE 值、LS 值、SR 值

Tab. 2 MSE, LS and SR value of different images

object	Evaluation function	Foucus image	Defocus image	Restored image
Matrix aperture	MSE	22.785	47.529	0.1532
	SR	0.4491	0.3417	0.6747
Resolution panel	MSE	5756.2	5856.2	41.135
	LS	21.96	18.95	237.82

模拟实验中计算的仅仅是 Zernike 多项式的第 4 到 12 项,高于第 12 项是属于高频部分,高频部分对光学系统成像质量影响较小,暂时没有考虑让其参与计算.由表 1 数据可以计算出相位差异技术计算得到的 Zernike 系数和预设系数 RMS 分别为 0.000163 和 0.0006,从而验证了将遗传算法运用于相位差异技术的正确性.

4 实验

实验系统结构主要由目标物体、光学成像系

统、采集图像系统组成.实验中在液晶显示器上显示一个矩孔作为目标物体,成像系统是安装在六维调整架上的双胶合凸透镜其焦距为 550 mm;光阑直径为 3 cm;采集图像所用 CCD 像素为 $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$ 离焦相位 PV 值控制在 1 个波长左右,实验中选取离焦距离为 1.70 mm;窄带滤光片中心波长是 531.5 nm,透过率 78%,半峰全宽 8.5 nm,直径 25.4 mm. CCD 安装在精度为 0.02 mm 的平移导轨上,通过移动高精密度平移导轨来实现离焦距离的精确控制.

实验先在电脑液晶显示器上显示 $3\text{pixel} \times 3\text{pixel}$ 大小的矩孔作为目标物体,在矩孔前面加入滤色片,仅仅让窄带光通过光学成像系统.分别选取焦面和离焦面 CCD 上 $128\text{pixel} \times 128\text{pixel}$ 大小区域的 256 级灰度图像,带入基于遗传算法编写的相关程序计算出 Zernike 多项式第 4 ~ 12 项系数,并恢复出目标物体.图 4 是实验中拍摄的焦面像和离焦像以及计算得到的恢复图像.

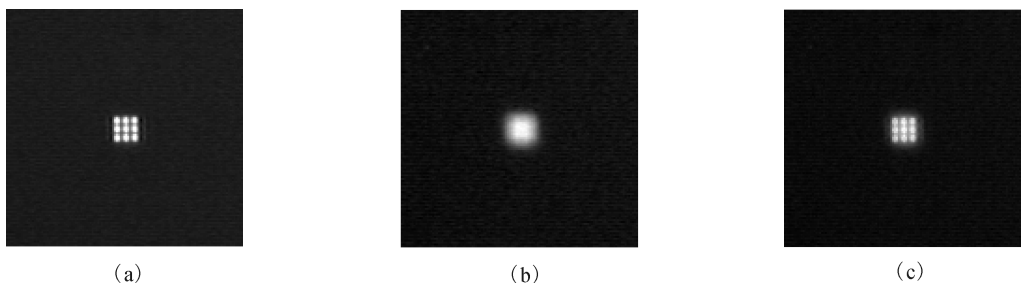


图 4 (a)焦面像、(b)离焦像和 (c)恢复像的对比

Fig. 4 Comparison of (a) focus image, (b) defocus image and (c) restored image

5 结 论

本文将遗传算法运用于求解相位差异技术中的大规模无约束非线性最优化评价函数,用遗传算法计算得到的 Zernike 多项式系数实现了波前检测与图像恢复.将遗传算法运用于相位差异技术恢复得到的图像细节更明显、分辨率更高、层次更分明、条纹更清晰,证明了遗传算法可以运用于相位差异技术准确计算出光学系统的波前相位信息,并利用计算得到的相位信息恢复目标物体,既可以将其运用于光学系统的精密检测也可以将其应用于图像处理.该方法有望成为大口径光电成像系统克服波前相位畸变的波前恢复、图像处理技术.

参考文献:

[1] Gonsalves, R A, Chidlaw R. Wavefront sensing by phase retrieval [J]. Appl Digit image proc III, Proc SPIE, 1979, 207: 32.

[2] Paxman R G, Seldin J H. Fine-research astronomical imaging with phase-diversity speckle [J]. SPIE, 1993, 2029: 287.

[3] Vogel C R, Chan T, Plemmons R. Fast algorithms for phase diversity-based blind deconvolutuon [C]// Adaptive optical system technologies. Kona, Hawaii, USA:SPIE, 1998.

[4] Bolcar M R, Fienup J R. Phase diversity with broadband illumination [J]. Adapt Opt Methods, 2007, 2007: 1.

[5] Meimon S, Thierry F, Mugnier L M. LIFT: a focal-plane wavefront sensor for real-time low-order sens-

ing on faint sources [J]. Opt Lett, 2010, 35: 3036.

[6] Serge M, Fusco T, Michau V, *et al.* Sensing more modes with fewer sub-apertures: the LIFTed Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. Opt Lett, 2014, 39: 2835.

[7] Löfdahl M G, Berger T E, Shine R S, *et al.* Preparation of a dual wavelength sequence of high-resolution solar photospheric images using Phase Diversity [J]. Astron J, 1998, 495: 965.

[8] Bolcar M R. Phase diversity for segmented and multi-aperture systems [D]. New York: University of Rochester, 2008.

[9] 韩杏子, 胡新奇, 俞信. 高分辨率空间光学系统位置误差的无波前传感综合校正 [J]. 光学学报, 2011, 31: 0626003.

[10] 张楠. 基于相位差异的地基望远镜图像恢复算法与 GPU 高速实现 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.

[11] 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: 1165.

[12] 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: 0701007.

[13] 马鑫学, 王建立, 王斌, 等. 相位恢复波前传感器测量精度的定量分析 [J]. 光学学报, 2013, 33: 1028001.

[14] 赵文静, 陈文静, 苏显渝. 几种时间相位展开方法的比较 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2016, 53: 110.

[15] 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: 0402009.

引用本文格式:

中文: 刘鑫, 李大海. 基于遗传算法的相位差异技术图像恢复 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2018, 55: 739.

英文: Liu X, Li D H. Recovering image using a genetic algorithm based phase diversity technology [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2018, 55: 739.