

相位板偏心对波前编码系统的成像影响分析

郭小虎 赵跃进 董立泉 刘 明 孔令琴 吴益剑

北京理工大学光电学院精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081

摘要 理论及实验分析了三次相位板的偏心对波前编码成像的影响。理论分析得到相位板倾斜和偏心后的波前编码系统的光瞳函数相位项的表达式。分析表明,当仅有偏心时,相位板位置变化会产生相位因子的变化效应和离焦量的改变,它们均与相位板的偏移量相关。同时仿真结果表明,偏心会改变点扩散函数(PSF)的能量分布及PSF包络的两条直角边长度,降低系统的调制传递函数(MTF)值; z 向偏心对PSF的影响小于 x 向或 y 向的偏心对PSF的影响。实验结果表明,偏心在一定的范围内对PSF的影响较小,复原图像在焦深范围内的清晰度一致性较好;但是偏心会降低焦深延拓率。实验结果与理论分析结果具有良好的一致性。研究结果对基于相位掩模板的波前编码系统在空间光学系统、显微系统、红外成像等领域的应用具有较高的参考价值。

关键词 成像系统;波前编码;三次相位板;偏心;相位因子;离焦量

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0809002

Analysis of Effect of Phase Plate Decenter on Wavefront Coding Imaging

Guo Xiaohu Zhao Yuejin Dong Liquan Liu Ming Kong Lingqin Wu Yijian

*Beijing Key Laboratory on Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology,
School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

Abstract The impact of cubic phase plate decenter on the imaging of wavefront coding system is analyzed, and the phase component of pupil function of wavefront coding system with the tilt and decenter parameters is calculated. It presents that decenter can also enlarge or reduce the phase factor and the amount of defocus. The simulation indicates that the decenter makes the system modulation transfer function (MTF) drop through changing the energy distribution and the sagittal or meridional length of point spread function (PSF). It also indicates that the effect of z -direction decenter is lower than that of x -direction or y -direction decenter. The experimental results show that decenter has lower influence on PSF in a certain range, and the clarity of restored images has excellent consistency in the range of depth of focus, but extension of depth of focus drops with decenter. The experimental results confirm the analysis of decenter. This study has high application value in the space optical system, microscopy system, and infrared imaging system with the wavefront coding technology.

Key words imaging system; wavefront coding; cubic phase plate; decenter; phase factor; amount of defocus

OCIS codes 110.7348; 110.4100; 100.2000

1 引 言

光学系统的景深或焦深一直以来都是光学领域的研究热点^[1-4],大景深或大焦深有利于获得更多的物空间信息。波前编码是20世纪90年代提出的一种新型的光学和数字图像处理相结合的具有景深或焦深延拓效果的光学成像技术^[5-9]。即在光学系统的光瞳面上放置一块相位板,改变原系统的点扩散函数(PSF)和调制

收稿日期: 2014-12-31; 收到修改稿日期: 2015-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(61377109)

作者简介: 郭小虎(1986—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: pz20040473@163.com

导师简介: 赵跃进(1958—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事电子稳像、THz成像技术、基于MEMS的红外成像技术等方面的研究。E-mail: yjzhao@bit.edu.cn(通信联系人)

传递函数(MTF),在更大的景深或者焦深范围内,使光学系统对离焦不敏感。它的作用是延拓原系统的景深或焦深,且在更大的景深或者焦深范围内得到清晰的图像,获得更多的物空间信息。近年来,波前编码技术被广泛应用到各领域。例如增大显微系统的景深,克服了显微系统数值孔径大、景深小的缺陷^[10-11],并降低色差对成像的影响^[12]。将波前编码技术应用于红外成像系统,解决红外光学系统由于温差导致像面离焦的问题^[13]。总之,应用波前编码技术可获得比原系统更多的物空间信息量,无论是在民用领域还是军用领域,都具有很强的研究和应用意义。

近年来,基于相位板的研究逐渐成为研究的热点,如Le等^[14]研究出正切函数的奇次型相位板面型,相比于传统的三次、对数以及正弦型相位板,正切型相位板使系统在相同的焦深范围内具有一致性更好的离焦传递函数。刘明等^[15]通过分析和仿真,从理论上证明混合型三次相位板比纯三次相位板具有更清晰、稳定的复原图像。Takahashi等^[16]研究了自由形式的相位板面型,得出该面型在焦深延拓时的系数最优解。闫峰等^[17-18]在光学设计过程中,先利用智能光瞳技术改善系统质量,然后通过引入数学软件实现了波前编码系统的快速优化,利用数学软件与光学设计的动态数据接口实现相位板面型的快速计算和优化,加快收敛速度。另外,赵廷玉等^[19]研究了对称型相位板对景深或焦深延拓的分析,还研究了当光线倾斜入射时,波前编码系统PSF的变化特点^[20]。这些研究的焦点主要集中在相位板的面型上,且都是基于理想光学系统的分析。而实际上,相位板偏心及倾斜会直接影响相位板光瞳函数的相位表达式,此解析式直接反映在相位板的面型上,从而改变波前编码系统的PSF和MTF,进而影响下一步的解码过程,有必要对其进行进一步研究。基于此,本文主要分析三次相位板的偏心对波前编码系统的PSF和成像质量的影响。

2 理论分析

根据波前编码理论,基于三次相位板的归一化光瞳函数的相位部分为

$$Z = \alpha(X^3 + Y^3) + W_{020}(X^2 + Y^2), \quad (1)$$

式中 α 为相位因子, W_{020} 为离焦量。位置偏差可以分为两类,一类是倾斜,另一类是偏心。其中倾斜量为 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$,偏心量为 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$,如图1所示。

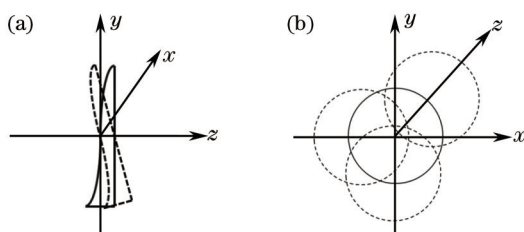


图1 位置偏差种类。(a)倾斜;(b)偏心

Fig.1 Types of position deviation. (a) Tilt; (b) decenter

用 (x, y, z) 表示倾斜和偏心后相位面的坐标。首先进行倾斜变换^[21],设倾斜角分别为 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$,即

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 R 为 R_x, R_y, R_z 之积(结果与顺序无关),

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix}, R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x \\ 0 & -\sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix}.$$

将(2)式代入(1)式,有

$$X^3 + Y^3 = Ax^3 + By^3 + Nz^3 + 3Cx^2y + 3Dx^2z + 3Exy^2 + 3Fzy^2 + 3Pxz^2 + 3Qyz^2 + 6Gxyz, \quad (3)$$

$$X^2 + Y^2 = Hx^2 + Iy^2 + Jz^2 + 2Kxy + 2Lxz + 2Myz. \quad (4)$$

接下来是偏心变换,设偏心量为 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$,用 $x-\Delta x, y-\Delta y, z-\Delta z$ 替换 x, y, z ;由于 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为微小量,可略去其高阶项;另外 z 也为微小量,也略去其高阶项; x, y, z 的交叉项也可略去。进一步化简,略去 x, y 三次以上的高次项、 x, y, α, W_{020} 的交叉项以及常数项,得到

$$z \approx \frac{1}{\cos \theta_x \cos \theta_y} \left\{ \begin{aligned} & \left[A\alpha - \frac{3D\alpha \tan \theta_y}{\cos \theta_x} - \frac{18\alpha^2}{\cos \theta_x \cos \theta_y} (D\Delta x + G\Delta y + P\Delta z)(A\Delta x - C\Delta y - D\Delta z) \right] x^3 + \\ & \left[B\alpha + 3F\alpha \tan \theta_x - \frac{18\alpha^2}{\cos \theta_x \cos \theta_y} (G\Delta x + F\Delta y + Q\Delta z)(B\Delta y - E\Delta x - F\Delta z) \right] y^3 + \\ & \left[3\alpha(A\Delta x - C\Delta y - D\Delta z) + HW_{020} - \frac{2LW_{020} \tan \theta_y}{\cos \theta_x} \right. \\ & \quad \left. + \frac{2HW_{020}^2 (J\Delta z - L\Delta x - M\Delta y)}{\cos \theta_x \cos \theta_y} - \frac{4LW_{020}^2 (H\Delta x + K\Delta y + L\Delta z)}{\cos \theta_x \cos \theta_y} \right] x^2 + \\ & \left[3\alpha(B\Delta y - E\Delta x - F\Delta z) + IW_{020} + 2MW_{020} \tan \theta_x \right. \\ & \quad \left. + \frac{2IW_{020}^2 (J\Delta z - L\Delta x - M\Delta y)}{\cos \theta_x \cos \theta_y} - \frac{4MW_{020}^2 (K\Delta x + I\Delta y + M\Delta z)}{\cos \theta_x \cos \theta_y} \right] y^2 + \\ & \frac{2LW_{020} - 6\alpha(D\Delta x + P\Delta z + G\Delta y)}{\cos \theta_x \cos \theta_y} (\Delta x \sin \theta_y + \Delta z \cos \theta_x \cos \theta_y - \Delta y \cos \theta_y \sin \theta_x) x + \\ & \frac{2MW_{020} - 6\alpha(F\Delta y + Q\Delta z + G\Delta x)}{\cos \theta_x \cos \theta_y} (\Delta x \sin \theta_y + \Delta z \cos \theta_x \cos \theta_y - \Delta y \cos \theta_y \sin \theta_x) y \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

式中

$$\begin{aligned} A &= \cos^3 \theta_y (\cos^3 \theta_z - \sin^3 \theta_z), \\ B &= (\cos \theta_z + \sin \theta_z) [(1 - \sin \theta_z \cos \theta_z) \cos^3 \theta_x + 3 \sin^2 \theta_x \sin^2 \theta_y \sin \theta_z \cos \theta_x \cos \theta_z] + \\ & \quad (\cos \theta_z - \sin \theta_z) [(1 + \sin \theta_z \cos \theta_z) \sin^3 \theta_x \sin^3 \theta_y - 3 \cos^2 \theta_x \sin \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z \cos \theta_z], \\ C &= \cos^2 \theta_y [\sin \theta_x \sin \theta_y \cos^3 \theta_z + \sin \theta_z \cos^2 \theta_z \cos \theta_x + \sin^2 \theta_z \cos \theta_x \cos \theta_z - \sin \theta_x \sin \theta_y \sin^3 \theta_z], \\ D &= \cos^2 \theta_y [\sin \theta_x \sin \theta_z \cos^2 \theta_z - \sin \theta_y \cos^3 \theta_z \cos \theta_x + \sin^2 \theta_z \sin \theta_x \cos \theta_z + \cos \theta_x \sin \theta_y \sin^3 \theta_z], \\ E &= \cos \theta_y \left[\frac{\sin^2 \theta_x \sin^2 \theta_y (\cos^3 \theta_z - \sin^3 \theta_z) + \cos^2 \theta_x \sin \theta_z \cos \theta_z (\sin \theta_z - \cos \theta_z)}{2 \sin \theta_x \cos \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z \cos \theta_z (\cos \theta_z + \sin \theta_z)} \right], \\ F &= (\sin \theta_x \sin \theta_y \cos \theta_z + \sin \theta_z \cos \theta_x) (\sin \theta_x \sin \theta_z - \sin \theta_y \cos \theta_x \cos \theta_z) + \\ & \quad (\cos \theta_x \cos \theta_z - \sin \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z) (\sin \theta_x \cos \theta_z + \sin \theta_y \cos \theta_x \sin \theta_z), \\ G &= \cos \theta_y \left[\frac{\cos \theta_z (\sin \theta_x \sin \theta_y \cos \theta_z + \sin \theta_z \cos \theta_x) (\sin \theta_x \sin \theta_z - \sin \theta_y \cos \theta_x \cos \theta_z)}{-\sin \theta_z (\cos \theta_x \cos \theta_z - \sin \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z) (\sin \theta_x \cos \theta_z + \sin \theta_y \cos \theta_x \sin \theta_z)} \right], \\ H &= \cos^2 \theta_y, \\ I &= \cos^2 \theta_x + \sin^2 \theta_x \sin^2 \theta_y, \\ J &= \sin^2 \theta_x + \sin^2 \theta_y \cos^2 \theta_x, \\ K &= \sin \theta_x \sin \theta_y \cos \theta_y, \\ L &= -\cos \theta_x \sin \theta_y \cos \theta_y, \\ M &= \sin \theta_y \sin \theta_z \cos \theta_z - \sin \theta_x \sin^2 \theta_y \cos \theta_x + \cos \theta_x \sin \theta_x, \\ N &= (\sin \theta_z \sin \theta_x - \sin \theta_y \cos \theta_x \cos \theta_z)^3 + (\sin \theta_x \cos \theta_z + \sin \theta_y \cos \theta_x \sin \theta_z)^3, \\ P &= \cos \theta_y [\cos \theta_z (\sin \theta_x \sin \theta_z - \sin \theta_y \cos \theta_x \cos \theta_z)^2 - \sin \theta_z (\sin \theta_x \cos \theta_z + \sin \theta_y \cos \theta_x \sin \theta_z)^2], \\ Q &= (\sin \theta_x \sin \theta_z - \sin \theta_y \cos \theta_x \cos \theta_z)^2 (\sin \theta_x \sin \theta_y \cos \theta_z + \sin \theta_z \cos \theta_x) + \\ & \quad (\sin \theta_x \cos \theta_z + \sin \theta_y \cos \theta_x \sin \theta_z)^2 (\cos \theta_x \cos \theta_z - \sin \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z). \end{aligned}$$

(5)式可以简记为

$$z = \beta_1 x^3 + \beta_2 y^3 + \beta_3 x^2 + \beta_4 y^2 + \beta_5 x + \beta_6 y, \quad (6)$$

式中 $\beta_1-\alpha$ 、 $\beta_2-\alpha$ 表示相位因子的变化效应,体现在 PSF 的两个直角边上能量分布的变化; β_3-W_{020} 、 β_4-W_{020} 表示离焦量的变化,表现为 PSF 包络的整体扩大或缩小; β_5 、 β_6 表示点扩散函数的偏移效应,即主光线在像面上的交点发生了偏移。以上 6 个系数共同影响波前编码系统的 PSF 形态和一致程度。根据(5)式可知,相位板的倾斜和偏心共同影响波前编码系统光瞳函数的相位项,进而进一步影响成像和解码。但是受限于实验室设备仪器,仅有三维位移平台,可对相位板的平移影响进行实验,而无实现相位板倾斜的实验仪器,因此无法对相位板的倾斜因素进行实验。为此仅分析相位板的偏心对波前编码系统的影响。当无倾斜($\theta_x=\theta_y=\theta_z=0$)、仅有偏心时,(5)式中各系数为

$$\begin{cases} A = B = \dots = H = I = 1 \\ J = K = L = M = N = P = Q = 0 \end{cases} \quad (7)$$

将(7)式代入(5)式,得到

$$z = [\alpha - 18\alpha^2(\Delta x + \Delta y)(\Delta x - \Delta y - \Delta z)]x^3 + [\alpha - 18\alpha^2(\Delta x + \Delta y)(\Delta y - \Delta x - \Delta z)]y^3 + [3\alpha(\Delta x - \Delta y - \Delta z) + W_{020}]x^2 + [3\alpha(\Delta y - \Delta x - \Delta z) + W_{020}]y^2 \quad (8)$$

2.1 沿 z 向偏心

当相位板仅在 z 方向有偏心时,即 $\Delta x=\Delta y=0$, $\Delta z \neq 0$, (8)式为

$$z = \alpha(x^3 + y^3) + (W_{020} - 3\alpha\Delta z)x^2 + (W_{020} - 3\alpha\Delta z)y^2 \quad (9)$$

(9)式表明,当相位板仅有 z 方向偏心时,三次项系数即相位因子不变,即对 PSF 包络的能量分布无直接影响。但是偏心会导致二次项系数(离焦量)的变化,即带来离焦像差,导致 PSF 的能量分布出现弥散。另外主光线在像面上的交点无偏移。

2.2 沿 x 向偏心

当相位板仅在 x 方向有偏心时,即 $\Delta z=\Delta y=0$, $\Delta x \neq 0$, (8)式为

$$z = (\alpha - 18\alpha^2\Delta x^2)x^3 + (\alpha + 18\alpha^2\Delta x^2)y^3 + (W_{020} + 3\alpha\Delta x)x^2 + (W_{020} - 3\alpha\Delta x)y^2 \quad (10)$$

(10)式表明,当相位板仅有 x 方向偏心时,同时具有相位因子的变化效应和离焦量的变化,主光线在像面上的交点无偏移。

2.3 沿 y 向偏心

当相位板仅在 y 方向有偏心时,即 $\Delta x=\Delta z=0$, $\Delta y \neq 0$, (8)式为

$$z = (\alpha + 18\alpha^2\Delta y^2)x^3 + (\alpha - 18\alpha^2\Delta y^2)y^3 + (W_{020} - 3\alpha\Delta y)x^2 + (W_{020} + 3\alpha\Delta y)y^2 \quad (11)$$

(11)式表明,当相位板仅有 y 向偏心时,同样具有相位因子的变化效应和离焦量的变化,主光线在像面上的交点也无偏移。

比较(9)~(11)式可知, z 向偏心不会引起相位因子的变化效应,仅引起离焦量的线性变化,导致 PSF 包络的扩大或缩小,但是二次项的系数相等,这说明 PSF 包络的两条直角边是相等的。而 x 向或 y 向偏心引起的相位因子变化是二次非线性的。当仅有 x 向偏心时,无论是正向偏心还是负向偏心,都会导致相位因子的非线性变化, x^3 的相位因子随着偏心量的增大而减小,使 PSF 弧矢方向的能量向中心主极大集中; y^3 的相位因子随着偏心量的增大而增大,使 PSF 子午方向的中心主极大能量降低,次极大以及其他各级能量增加。另外, x 向偏心也会导致离焦量的变化,但 x^2 和 y^2 的系数不相等,这会使得 PSF 包络的两条直角边不相等。 y 向偏心的影响与 x 向偏心恰好相反。

通过分析还可知, z 向偏心仅导致离焦量的变化, x 向和 y 向偏心同时导致相位因子和离焦量的变化,而波前编码系统本身对离焦具有不敏感的特性,因此 z 向偏心导致的 PSF 变化效果明显小于 x 向和 y 向偏心导致的变化效果。另外, x 向或 y 向偏心时,PSF 能量分布也发生变化,其中一个方向的能量加强必然导致另一个方向的能量减弱。因此,随着 x 向或 y 向偏心量的逐渐增大,PSF 的能量分布变得极不均匀,导致 PSF 两条边的比例失衡,继续增大偏心量,PSF 将出现严重变形,进而影响后续对模糊图像的复原过程和焦深拓展效果。

3 仿真分析

为验证上述推导结论,用 Zemax 光学软件仿真波前编码系统的 PSF 随相位板分别沿 x 、 y 、 z 方向偏心的变

化过程。光学系统为三镜卡塞格林(TMC)系统,如图2所示。基本参数如下:焦距为8 m, $F/\#$ 为13.3,工作中心波长为0.6 μm 。相位板位于系统的出瞳面上,其结构参数为 $\varphi 40\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 。根据第2节的分析可知,偏心量过大会导致PSF严重变形,从而影响复原效果,同时影响系统的焦深延拓率。表1为不同偏心量、不同离焦位置的TMC波前编码系统PSF的变化情况。

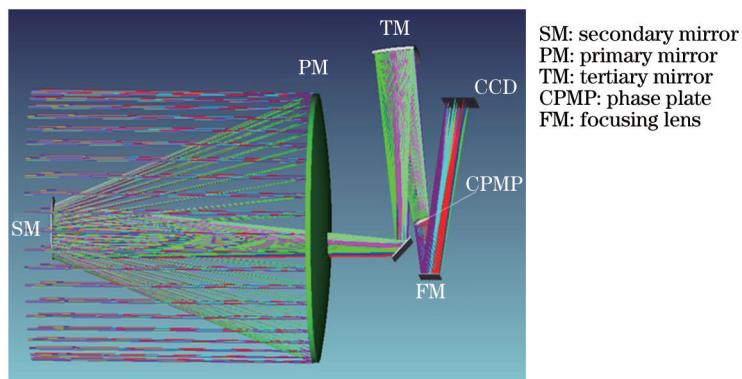


图2 TMC波前编码系统

Fig.2 TMC system with wavefront coding

表1 不同偏心量、不同离焦位置的PSF

Table 1 PSF with different decenters and defocused positions

	-15δ	-10δ	0	10δ	15δ
$\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$					
$\Delta z = -15\text{ mm}$					
$\Delta z = 15\text{ mm}$					
$\Delta x = -3\text{ mm}$					
$\Delta x = 3\text{ mm}$					
$\Delta y = -3\text{ mm}$					
$\Delta y = 3\text{ mm}$					

前期的仿真计算表明,加入相位板后,无偏差波前编码系统的焦深至少为原焦深(设原焦深为 δ)的30倍,

为了研究位置偏差对成像以及焦深延拓情况的影响,在表1中考查点的位置分别为焦前(-15 δ),焦前(-10 δ),对焦(0),焦后(10 δ),焦后(15 δ)。

当无偏心且对焦时,PSF的包络形状是等腰直角三角形,如表1第2行第4列所示。随着 z 向偏心的增大,离焦量也增大,但PSF的形状几乎不变,仅PSF的能量发生弥散,导致其尺寸有所增大。随着 x 向或 y 向偏心的增大,PSF的尺寸和形状都发生改变。以表1第5行第4列(对焦)为例, x 的负向偏心导致相位因子减小,使PSF弧矢边各次极大能量降低,能量向中心主极大集中,子午边能量从中心向边缘分散,各次极大能量增大; x 的负向偏心导致离焦量的变化使弧矢边和子午边同时发生弥散,最终使PSF包络扩大。而对于表1第5行第3列(焦前),(10)式中的 W_{020} 为负, x 负向偏心使得 x 的平方项系数绝对值大于 y 的平方项系数绝对值,即弧矢边的离焦量大于子午边的离焦量,所以相比于对焦处的PSF,焦前处的弧矢边长大于子午边长。

其余位置的PSF变化同理也可分析。这些变化效果都很好地印证了第2节的推导过程及其结论。因此从表1的PSF变化可以明显看出, z 向偏心对PSF的影响较小, x 向和 y 向的偏心对PSF的影响效果大于 z 向偏心。表1的内容还可以进一步印证,相位因子的变化对PSF的影响大于离焦量的变化。另外,通过比较表1的第2,3,5,6列可以看出,对于第2行对应的无偏差理想系统,在对焦点前后不同位置处的PSF的一致性比较好,各个极大光斑分布明显、均匀,因此其焦深最多可以扩展到原焦深30倍(-15 δ ,15 δ)的范围;而其余几行对应的偏差系统,随着逐渐偏离对焦位置,尤其是(-15 δ ,-10 δ)和(10 δ ,15 δ)这两个范围,PSF的形态以及能量分布都发生了明显的变化,一致性仅仅在(-10 δ ,10 δ)范围得以保证,即焦深仅能扩展到原焦深的20倍。

4 实验结果及分析

PSF的变化会影响实际成像质量,进而影响复原图像的质量,同时影响系统的焦深。为了验证这个结论,在第3节仿真的基础上搭建波前编码系统。TMC系统包括主镜(PM)、次镜(SM)、反射镜(PLM)、三镜(TM)、相位板(CPMP)和调焦镜(FM),其中,相位掩模板放置于系统的出瞳面上,如图3所示。先由电荷耦合元件(CCD)采集获取模糊图像,再经过维纳滤波得到复原图像,通过比较在不同偏心量、不同离焦量下的复原图

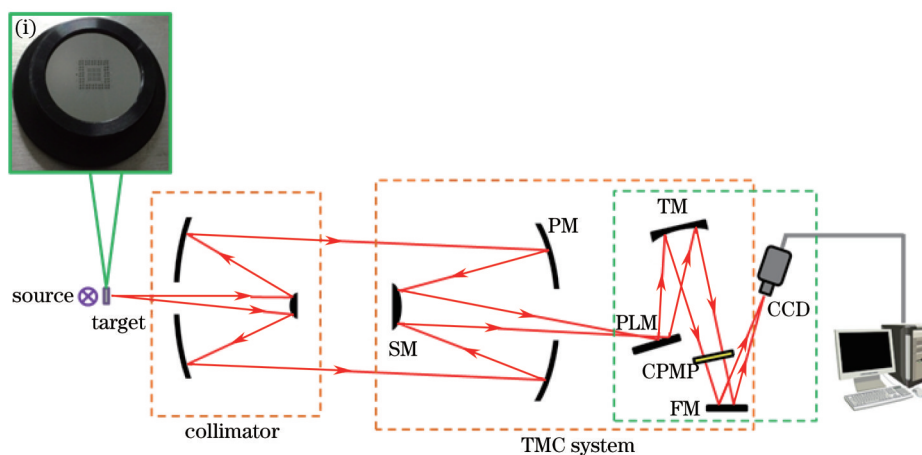


图3 TMC波前编码系统实验装置

Fig.3 Experimental setup of TMC system with wavefront coding

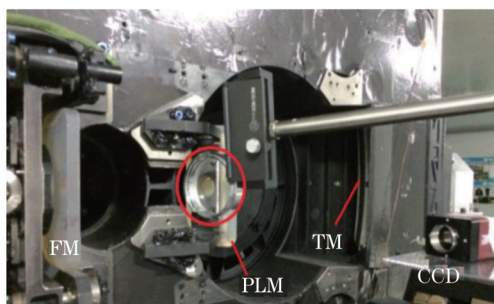


图4 相位板在系统中的位置

Fig.4 Position of phase plate in TMC system

像的质量来验证上述结论的正确性。

图3中标准分辨率板经光源照明形成平行光,进入TMC系统并成像于CCD上。其中反射镜、三镜、相位板、调焦镜和CCD的实物如图4所示。相位板(圆框内所示)与刚性杆连接,刚性杆连接在三维坐标微动平移台上,通过微动平移台控制相位板的偏心量。

实验所用的标准分辨率板图案如图5(a)所示,经波前编码系统成模糊的图像,如图5(b)所示。为了得到清晰的图像,还需将模糊图像进行解码复原,表2为与表1对应的不同偏心量、不同离焦处的TMC波前编码系统的复原图像。

表2的实验复原图像可以很好地印证表1的仿真结果:第2行的无偏差理想系统在 $(-15\delta, -15\delta)$ 的焦深范

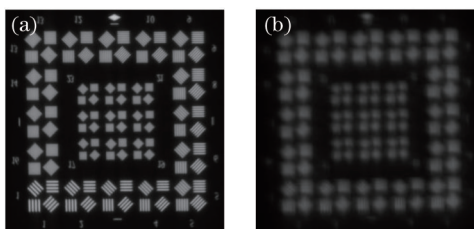


图5 标准分辨率板。(a) 原图; (b) 波前编码系统所成模糊图像

Fig.5 Standard resolution plate. (a) Original image; (b) blurred image

表2 不同偏心量、不同离焦处的复原图像

Table 2 Restored images with different decenters and defocused positions

	-15δ	-10δ	0	10δ	15δ
$\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$					
$\Delta z = -15\text{ mm}$					
$\Delta z = 15\text{ mm}$					
$\Delta x = -3\text{ mm}$					
$\Delta x = 3\text{ mm}$					
$\Delta y = -3\text{ mm}$					
$\Delta y = 3\text{ mm}$					

围内可以通过滤波复原出清晰的图像,且一致性较好;其他几行的偏差系统仅在 $(-10\delta, 10\delta)$ 的焦深范围内可以复原出一致度较好的清晰图像,而在 $(-15\delta, -10\delta)$ 和 $(10\delta, 15\delta)$ 的范围内不能复原出清晰的图像。所以无偏差理想系统的焦深延拓率为30倍,而偏差系统的焦深延拓率只有20倍。

波前编码的复原图像是根据系统的PSF经过滤波解码得到,因此表2的复原图像是根据表1中对焦处且无偏心时的PSF经维纳滤波得到。判断复原图像优劣的标准有两个,一个是复原图的质量,另一个是这些图像的一致性,而图像的MTF曲线恰好可以同时以上两个指标进行验证。

CCD像素单元尺寸为 $8.75\ \mu\text{m}\times 8.75\ \mu\text{m}$,所以截止频率为 $57.14\ \text{lp/mm}$ 。对表2中的复原图像分别进行计算,得到对应的MTF曲线,如图6所示。曲线可分为三簇:第①簇表示表2第2行无偏心理想系统的复原图像;第②簇表示偏心系统第3~5列的复原图像;第③簇表示偏心系统第2、6列的复原图像。根据上述的两个评判标准,第①簇MTF高频段($25\sim 57.14\ \text{lp/mm}$)的值在0.3以上,且一致性好,说明在 $(-15\delta, 15\delta)$ 的焦深范围内复原图像质量达到了光学系统像质的最低要求;第②簇MTF高频段($35\sim 57.14\ \text{lp/mm}$)的值在0.3左右,在低频段($5\sim 20\ \text{lp/mm}$)有起伏变化,一致性比第①簇稍有偏低,这说明在 $(-10\delta, 10\delta)$ 的焦深范围内复原图像质量也达到了成像的最低要求;第③簇MTF曲线从 $25\ \text{lp/mm}$ 开始就下降到0.3以下,在高频段($40\sim 57.14\ \text{lp/mm}$)的值已经降到了0.2左右,说明复原图像质量较差,焦深无法延拓到 $(-15\delta, -10\delta)$ 和 $(10\delta, 15\delta)$ 这两个范围。

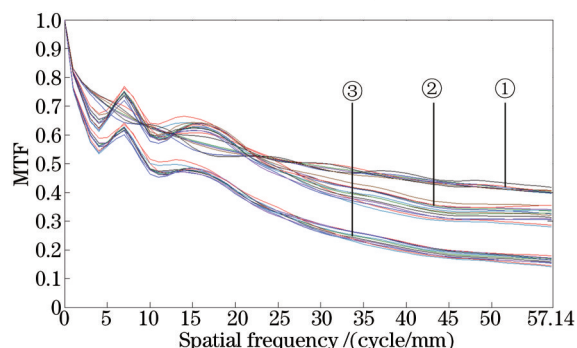


图6 复原图像MTF曲线

Fig.6 MTF curves of restored images

5 结 论

建立了带有倾斜和偏心的波前编码光瞳函数相位项的理论模型,并分析仅有偏心时的相位项的近似解析式。从解析式可以看出,偏心通过相位因子的变化和离焦量的变化共同影响系统的PSF,且沿 z 向偏心对PSF的影响小于 x 向和 y 向偏心带来的影响。仿真表明在一定的偏心范围内,其对系统PSF的影响较小;仿真还表明偏心会影响系统的焦深延拓率。通过实验进一步验证了仿真的结论,即在一定的偏心范围和焦深范围内,相位板的位置对图像复原影响较小;但在更大的焦深范围内,无偏心系统能够获得清晰的复原图像,而偏心系统无法得到,这说明偏心会降低系统的焦深延拓率。结果还说明,波前编码系统相位板相比传统光学系统的光学元件具有更强的偏心容忍度,尤其体现在 z 向偏心上。因此波前编码技术可以很好地应用于空间光学系统、显微系统、红外系统等各种常见的光学系统,具有广泛的应用和参考价值。

参 考 文 献

- 1 Xiao Jinsheng, Du Kanghua, Tu Chaoping, *et al.*. Depth of field simulation display for multi-focus images based on phased Gaussian kernel[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1011006.
肖进胜, 杜康华, 涂超平, 等. 基于相控高斯核的多聚焦图像景深模拟[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1011006.
- 2 Wang Zhongxun, Pan Yiming, Yin Shaoyun, *et al.*. Laser processing lens of long focal depth and high resolution[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0222004.
王仲勋, 潘一鸣, 尹韶云, 等. 长焦深、高分辨激光加工聚焦透镜[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0222004.
- 3 Wang Tianyang, Xu Zhaopeng, Zhu Huafeng, *et al.*. Effect of incident light field distribution on super-resolution and DOF of super-resolution pupil filter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 112301.
王天阳, 徐兆鹏, 朱化凤, 等. 入射光场分布对超分辨光瞳滤波器超分辨性能和焦深的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2014,

- 51(11): 112301.
- 4 Yu Lu, Cheng Dewen, Zhou Wei, *et al.*. Optimization design of rigid endoscope with high definition and large depth of field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1122003.
禹 璐, 程德文, 周 伟, 等. 大景深高清硬性内窥镜光学系统的优化设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1122003.
- 5 Dowski Jr E R, Cathey W T. Extended depth of field through wave-front coding[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(11): 1859–1866.
- 6 Bagheri S, Silveira P E X, de Farias D P. Analytical optimal solution of the extension of the depth of field using cubic-phase wavefront coding. Part I. Reduced-complexity approximate representation of the modulation transfer function[J]. *JOSA A*, 2008, 25(5): 1051–1063.
- 7 Zhang W Z, Ye Z, Zhao T Y, *et al.*. Point spread function characteristics analysis of the wavefront coding system[J]. *Optics Express*, 2007, 15(4): 1543–1552.
- 8 Prischepa I A, Dowski Jr E R. Wavefront coded zoom lens system[C]. *SPIE*, 2001, 4487: 83–93.
- 9 Pan C, Chen J B, Zhang R F, *et al.*. Extension ratio of depth of field by wavefront coding method[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13364–13371.
- 10 Tucker S, Cathey W T, Dowski Jr E. Extended depth of field and aberration control for inexpensive digital microscope systems[J]. *Optics Express*, 1999, 4(11): 467–474.
- 11 Liu Qinxiao, Yu Feihong. Design and research of wavefront coding microscope system based on traditional microscope system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0322004.
刘钦晓, 余飞鸿. 基于传统显微系统的波前编码显微系统设计研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0322004.
- 12 Wach H B, Dowski Jr E R, Cathey W T. Control of chromatic focal shift through wave-front coding[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(23): 5359–5367.
- 13 Dowski Jr E R, Kubala K S. Reducing size, weight, and cost in a LWIR imaging system with wavefront coding[C]. *SPIE*, 2004, 5407: 66–73.
- 14 Le V N, Chen S Q, Fan Z G. Optimized asymmetrical tangent phase mask to obtain defocus invariant modulation transfer function in incoherent imaging systems[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 2171–2174.
- 15 Liu M, Dong L Q, Zhao Y J, *et al.*. Stationary phase analysis of generalized cubic phase mask wavefront coding[J]. *Optics Communications*, 2013, 298: 67–74.
- 16 Takahashi Y, Komatsu S. Optimized free-form phase mask for extension of depth of field in wavefront-coded imaging[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(13): 1515–1517.
- 17 Yan Feng. Intelligent pupil technology applied on TMA system on space-borne camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 051101.
闫 锋. 应用于TMA系统的智能光瞳技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(5): 051101.
- 18 Yan Feng. Optimization technique of wavefront coded system based on modulation transfer function invariance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0411004.
闫 锋. 基于调制传递函数相似度的波前编码系统优化技术[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0411004.
- 19 Zhao T Y, Chen Y P, Zhang W Y, *et al.*. Focal depth extending using rotational symmetric pupil masks[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(2): 71–73.
- 20 Zhao Tingyu, Ye Zi, Zhang Wenyu, *et al.*. The extension effect of point spread function in wavefront coding system due to off-axis illumination[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(1): 200–205.
赵廷玉, 叶 子, 张文字, 等. 倾斜入射的波前编码系统的点扩散函数扩大效应分析[J]. *物理学报*, 2008, 57(1): 200–205.
- 21 Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. *Geometrical Optics Aberrations and Optical Design*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007: 154–155.
李晓彤, 岑兆丰. *几何光学像差光学设计*[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007: 154–155.

栏目编辑: 吴秀娟