

doi:10.3788/gzxb20184710.1011003

# 大景深成像系统中目标离焦量的测定

周亮,刘朝晖,单秋莎,折文集

(中国科学院西安光学精密机械研究所,西安 710119)

**摘 要:**以三次相位板为例,基于菲涅尔积分法建立了相位板横向偏移量与成像系统离焦量之间的函数关系.由于解码图像中伪影现象的产生是由编码点扩散函数和解码点扩散函数的不一致引起的,可将伪影现象作为成像系统离焦量的评判标准.结合相位板横向偏移量与离焦量的关系和产生伪影现象的物理内涵,提出了大景深成像系统中物体离焦量的测定方法.该方法可同时获取目标的离焦像差图和大景深、无伪影的解码图像,并对所提出的方法进行了实验验证.此外,本文所提出的方法同样适用于其他奇对称型相位板,这进一步拓展了奇对称型相位板景深延拓成像系统在实际应用中的范围.

**关键词:**相位板;景深延拓;点扩散函数;伪影;离焦量

中图分类号:O438.2; O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)10-1011003-8

## Measurement of the Object Defocus with Extended Depth-of-field Imaging System

ZHOU Liang, LIU Zhao-hui, SHAN Qiu-sha, SHE Wen-ji

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** The relationship between defocus and the lateral shifts of cubic phase mask has been built based on the Fresnel integral. Based on the fact that the artifacts appeared in the decoded images are resulted from the differences between the coding and decoding point spread function, the artifacts can be treated as indicators of defocus. Finally, we combined the built relationship previously and the reason producing artifacts in the decoded images to propose an imaging way to obtain defocus map and artifacts-free images with laterally shifted cubic phase mask, which subsequently verified by experiments with our designed imaging system. The proposed method avoids errors introduced by shifting the ideal imaging plane deliberately. Moreover, although the idea we developed only was analyzed and illustrated with cubic phase mask, it also can be generalized to other types of odd-symmetric phase masks, which further widen the application range of odd-symmetric phase mask imaging system.

**Key words:** Phase mask; Extended depth-of-field; Point spread function; Artifacts; Defocus

**OCIS Codes:** 110.7348; 110.6880; 110.1758; 220.4830

## 0 引言

波前编码可以在不降低成像系统光通量和不牺牲成像系统分辨率的前提下,有效扩展成像系统的景深范围<sup>[1]</sup>,自提出以来就受到了研究者的广泛关注.作为波前编码成像系统的核心光学元件——相位板,其形式也越来越多样化,包括三次型<sup>[1]</sup>、对数型<sup>[2]</sup>、指数型<sup>[3]</sup>、多项式型<sup>[4]</sup>、有理式型<sup>[5]</sup>、正弦型<sup>[6]</sup>、正切型<sup>[7]</sup>、平方根型<sup>[8]</sup>以及反函数型<sup>[9]</sup>等,按其对称性可分为旋转对称型和非旋转对称型,其中大部分非旋转对称型属于奇对称型.旋转对称型相位板的景深扩展率不大,一般只有原成像系统的几倍,且解码图像中噪声放大现象较为严重<sup>[10]</sup>.奇对称型相位板具有较大的景深扩展率,因而对其的研究和应用也较为广泛.

**基金项目:**国家高技术研究发展计划(No.2013AA7088047)和中国科学院"西部之光"人才培养引进计划(No.XAB2017B27)资助

**第一作者:**周亮(1989—),男,助理研究员,博士,主要研究方向为计算成像. Email:zhouliang@opt.ac.cn

**收稿日期:**2018-05-04; **录用日期:**2018-07-04

<http://www.photon.ac.cn>

针对相位板的横向偏移,文献[11]从空间域和频率域对两三次相位板的组合偏移进行了较为详细的研究,得到了成像系统的点扩散函数大小及截止频率与两三次相位板偏移量之间的函数关系.在奇对称型相位板大景深成像系统的最终解码图像中可观察到伪影现象,体现为图像高频内容的复制现象,这极大地影响了其最终成像质量.Demenikov 等<sup>[12]</sup>对三次相位板解码图像中的伪影现象进行了分析,阐明了其是由编码和解码时点扩散函数的不一致引起的.Zammit 等<sup>[13]</sup>提出互补核匹配(Complementary Kernel Matching, CKM)方法用于测定离焦量,其机理是三次相位板和其复共轭编码后的两幅解码图像之间的差异与离焦像差有关.此后,Zammit<sup>[14]</sup>等对 CKM 进行改进,改变了原有两幅图像的记录方式,通过记录关于理想像面对称的偏离理想像面一定位置的两幅图像,后利用他们解码图像之间的差异来获得目标的离焦图,进一步用于 3D 成像<sup>[15]</sup>,此过程需要人为轴向移动理想像面一定距离或采用额外装置来引入特定的离焦量.

本文在文献[11]的基础上,简化两组合三次相位板横向偏移情况为单一三次相位板的横向偏移,建立了三次相位板横向偏移量与离焦量的函数关系,阐明了可通过横向偏移相位板来实现成像系统特定的离焦.基于构建的函数关系,结合 CKM 方法的成像原理,提出了基于相位板横向偏移的大景深成像系统中目标离焦量的测定方法,该方法不再对理想像面进行刻意的轴向移动,可防止在成像系统标定过程中由像面的位置不准确引入额外误差.最后给出了相应的实验,验证了三次相位板大景深成像系统中目标的离焦量测定方法的可行性,并说明了该成像方法可推广至其它奇对称型相位板景深延拓成像系统中.

## 1 目标离焦量测定原理

### 1.1 三次相位板横向偏移量与离焦量的关系

含有横向偏移量的三次相位板归一化一维形式表示为

$$Q(\hat{x}) = \alpha (\hat{x} + \hat{m})^3 \quad |\hat{m}| < 1 \quad |\hat{x}| \leq 1 \quad (1)$$

式中, $\alpha$  为三次相位板的归一化相位系数, $\hat{x}$  表示半光瞳口径归一化的光瞳坐标, $\hat{m}$  表示三次相位板半光瞳口径归一化的横向偏移量.

采用菲涅尔积分法对含横向偏移量的三次相位板的光学传递函数进行求解,并依据截止频率处成像系统的调制传递函数为零这一事实,基于文献[11]可得含横向偏移量的三次相位板大景深成像系统的归一化截止频率  $u_c$  为

$$u_c = 2 - \left| 2\hat{m} + \frac{2kW_d}{3\alpha} \right| \quad (2)$$

式中, $W_d$  表示离焦像差, $k$  为波数,可以看出离焦像差和三次相位板的横向偏移量共同影响系统的截止频率.假设成像系统的归一化截止频率的变化较小,变化量可忽略,则有

$$2\hat{m} + \frac{2kW_d}{3\alpha} \approx 0 \quad (3)$$

即

$$W_d \approx -\frac{3\alpha\hat{m}}{k} \quad (4)$$

由此可得,三次相位板的横向偏移会引起成像系统离焦,且离焦量和三次相位板横向偏移量满足特定的关系.

### 1.2 三次相位板解码图像中的伪影现象分析

从空间域来讲,伪影现象的产生是由编码和解码时系统的点扩散函数之间的差异造成的,这说明不同离焦像差情况下三次相位板的点扩散函数不再保持一致.从频域来讲,虽然不同离焦像差下的三次相位板的调制传递函数基本相同,但相位传递函数存在差异,且这种差异不再简单地是空间频率的线性函数.

由文献[11]中三次相位板的精确光学传递函数表达式可得出其准确的相位传递函数表达式为

$$\text{PTF}(u, W_d) = \frac{\alpha u^3}{4} - \frac{k^2 W_d^2 u}{3\alpha} + \arctan \frac{S[t_u(u, W_d)] - S[t_l(u, W_d)]}{C[t_u(u, W_d)] - C[t_l(u, W_d)]} \quad (5)$$

式中, $u$  表示归一化空间频率, $C$  和  $S$  分别表示菲涅尔积分的余弦和正弦项, $t_u$  和  $t_l$  分别为菲涅尔积分的上下限,具体表达式为

$$\begin{cases} t_u = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[ \sqrt{a} \left( 1 - \frac{|u|}{2} \right) + \frac{b}{2\sqrt{a}} \right] \\ t_l = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[ \sqrt{a} \left( -1 + \frac{|u|}{2} \right) + \frac{b}{2\sqrt{a}} \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $a$  和  $b$  为变量替换参数,具体表达式为

$$\begin{cases} a = 3\alpha u \\ b = 2kW_d u \end{cases} \quad (7)$$

由(5)式可以看出,相位传递函数不但包含了与离焦像差无关项和有关项,还涉及与离焦像差成非线性关系的项.文献[12]指出导致解码图像中伪影现象的原因是相位传递函数中的非线性项,这是由于式(5)中离焦像差平方项与空间频率呈线性关系,这只会引起图像内容在空间域内的整体平移,不会影响图像质量.当解码点扩散函数与编码点扩散函数相同时,即解码与编码时的离焦像差相同时,此时关于离焦像差的线性项和非线性项的差异都为零,则解码图像中不出现伪影现象.因此,衡量解码图像中的伪影现象只需关注与空间频率呈线性关系的离焦像差平方项.

假设三次相位板景深延拓成像系统的编码中间图像对应离焦像差为  $W_{d,0}$ ,对该编码图像解码时,采用的点扩散函数对应于系统离焦像差为  $W_{d,r}$ ,则依据式(5)中关于空间频率的线性项可得出由离焦像差不同引起的相位差异为

$$\Delta\text{PTF}_1(u, W_{d,r}, W_{d,0}) \approx -\frac{k^2 W_{d,0}^2 u}{3\alpha} - \left( -\frac{k^2 W_{d,r}^2 u}{3\alpha} \right) = \frac{k^2 u}{3\alpha} (W_{d,r}^2 - W_{d,0}^2) \quad (8)$$

频率域的相移对应于空间域的位移,由三次相位板的坐标可分离性,可得出空间域内图像内容沿图像对角线方向发生平移,平移量大小为

$$\Delta\rho(x_i, y_i) = \frac{\sqrt{2}}{2\pi u} \Delta\text{PTF}_1(u, W_{d,r}, W_{d,0}) = \frac{\sqrt{2}k^2}{6\pi\alpha} (W_{d,r}^2 - W_{d,0}^2) \quad (9)$$

式中,  $x_i$  和  $y_i$  表示图像的空间坐标.由此可以看出,由解码图像内容的平移量大小可确定编码和解码时离焦像差的差异.

### 1.3 基于相位板偏移的目标离焦量测定

由前述分析可知,若解码图像和原始理想图像之间的差异为零,即平移量为零,则解码图像中不出现伪影,同时可获得正确的离焦像差,但是难点在于原始理想图像是未知的.文献[14]提出通过记录关于理想像面(焦面)对称的,满足一定离焦像差  $+\delta W_d$  和  $-\delta W_d$  的两位置处三次相位板的编码图像,避免了原始理想图像未知的弊端.根据式(6),则记录的两幅图像与其各自解码图像之间的相位差为

$$\begin{cases} \Delta\text{PTF}_d^+ = -\frac{k^2 (W_{d,0} + \delta W_d)^2 u}{3\alpha} + \frac{k^2 (W_{d,r} + \delta W_d)^2 u}{3\alpha} \\ \Delta\text{PTF}_d^- = -\frac{k^2 (W_{d,0} - \delta W_d)^2 u}{3\alpha} + \frac{k^2 (W_{d,r} - \delta W_d)^2 u}{3\alpha} \end{cases} \quad (10)$$

依据式(7),则这两幅解码图像之间的空间域平移量为

$$\Delta\rho_d(x_i, y_i) = \frac{\sqrt{2}}{2\pi u} (\Delta\text{PTF}_d^+ - \Delta\text{PTF}_d^-) = \frac{2\sqrt{2}k^2 \delta W_d}{3\pi\alpha} (W_{d,r} - W_{d,0}) \quad (11)$$

此方法的弊端在于需要刻意轴向偏移理想像面以满足离焦像差  $+\delta W_d$  和  $-\delta W_d$ ,为了消除轴向移动理想像面引起的误差,提出采用横向偏移三次相位板一定距离  $\delta \hat{m}$  来实现成像系统特定的离焦像差,参照式(4),只需满足

$$\delta W_d = -\frac{3\alpha \delta \hat{m}}{k} \quad (12)$$

即三次相位板的横向归一化偏移量  $\delta \hat{m}$  满足

$$\delta \hat{m} = -\frac{k \delta W_d}{3\alpha} \quad (13)$$

由此可看出,通过式(9)两幅图像之间的差异最小时可获得系统正确的离焦像差,进而采用正确离焦像差下的点扩散函数进行解码,可获得大景深无伪影的图像,而且还可获得成像系统带符号的离焦像差图,由此可测定目标的离焦量.此外,满足离焦像差  $\delta W_d$  要求所需偏移理想像面的轴向距离  $\Delta$  为

$$\Delta = 8F^2 \delta W_d \quad (14)$$

式中,  $F$  表示成像系统的  $F$  数,由此可看出在满足同离焦像差  $\delta W_d$  的情况下,横向偏移量要小于轴向偏移量,这有利于减小轴向偏移理想像面引入的误差.

## 2 目标离焦量测定成像系统设计及验证

### 2.1 三次相位板横向偏移量与离焦量的关系验证

设计时将三次相位板置于成像系统的光瞳处,其归一化相位系数采用文献[9]已优化的系数 87.356,其半口径大小约为 7 mm,但是为了保证三次相位板有横向偏移的余量,设计其半口径为 10 mm,此时与之对应的归一化相位系数变为原来的  $(10/7)^3$  倍,光学系统的全视场角为  $20^\circ$ ,焦距  $f = 100$  mm,  $F = 4$ .则具有横向偏移量的三次相位板成像系统示意图见图 1.

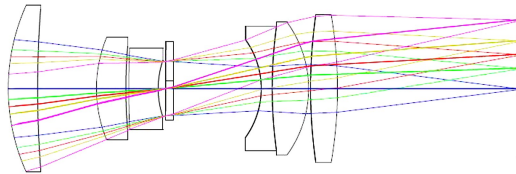


图 1 横向偏移三次相位板成像系统示意图

Fig.1 Diagram of imaging system with laterally shifted cubic phase mask

为了验证横向偏移量与离焦量之间的关系,即式(4),给出上述成像系统在三次相位板不同横向偏移情况下轴上视场 90 lp/mm 处调制传递函数随离焦距离的变化曲线见图 2.

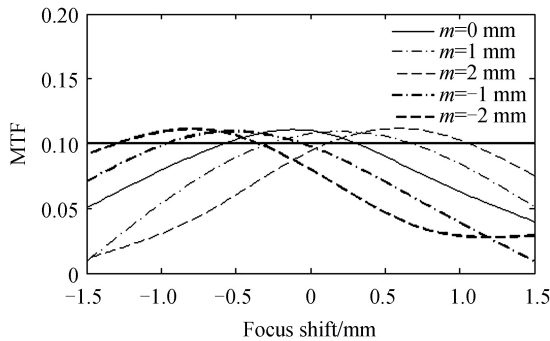


图 2 不同横向偏移量情况下调制传递函数值变化曲线

Fig.2 MTF curves with different lateral shifts

图 2 中  $m$  代表三次型相位板实际偏移量,其值可正可负,正值代表负向偏移,负值代表正向偏移.选取调制传递函数阈值为 0.1,由图 2 横向偏移量与焦面偏移之间的关系可以验证表达式(4)近似的正确性.

### 2.2 大景深成像系统中目标离焦量的计算方法

根据 1.3 节理论,采用横向偏移三次相位板实现成像系统轴向离焦像差  $+\delta W_d$  和  $-\delta W_d$ ,成像示意图如图 3 所示,像面在两位置记录的中间编码图像分别为  $r_c^+$  和  $r_c^-$ ,其中  $L$  为成像透镜组, $P$  为成像系统的光瞳, $C$  代表三次相位板,然后采用其各自对应的一系列离焦像差情况下的点扩散函数  $h_m^+$  和  $h_m^-$  对两幅编码图像  $r_c^+$  和  $r_c^-$  分别解码 ( $\ast^{-1}$ ),构成其各自的解码图像三维矩阵  $i^+$  和  $i^-$ ,第  $m$  层对应第  $m$  个点扩散函数的解码图像,为了通过两幅图像之

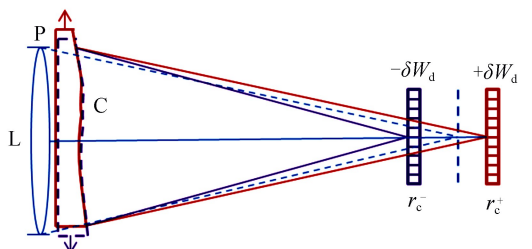


图 3 横向偏移三次相位板成像示意图

Fig.3 Imaging schematic of laterally shifted cubic phase mask

间的差异求出正确的离焦像差,取同层两幅解码图像之间的绝对值差异,经高斯滤波以抑制噪声后再作为差异衡量矩阵,其每一层具体表达式为

$$M_m(x_i, y_i) = G(|i_m^+(x_i, y_i) - i_m^-(x_i, y_i)|) \quad m \in [1, N] \quad (15)$$

式中,  $G$  代表高斯滤波,  $N$  为点扩散函数总个数.将解码图像的差异矩阵  $M_m$  按层排列,构成总的差异矩阵  $M$ .上述三维矩阵  $M$  的构建过程示意图见图 4.

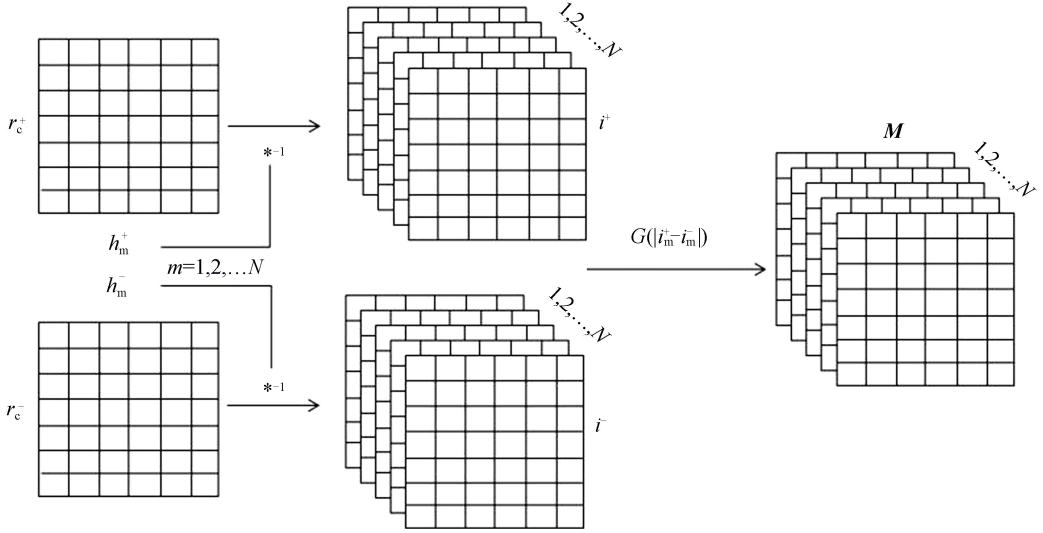


图 4 差异矩阵  $M$  构建过程

Fig.4 Process to build the discrepancy metric

针对每一个像素点  $(x_i, y_i)$  寻找差异矩阵  $M$  最小时对应的层值  $\text{ind}$ , 因为每一层与特定离焦像差下的点扩散函数对应, 则  $\text{ind}$  值与离焦像差相对应, 进而可得每一个像素点的离焦像差, 即得到了目标的离焦像差图  $W_d(x_i, y_i)$ . 此外, 依据上述得出的每个像素点的  $\text{ind}$  值, 在解码图像三维矩阵  $\text{ind}$  层中寻找该像素点位置对应的无伪影的像素点, 再把无伪影的像素点放在对应于最终解码图像的位置, 直到寻找完所有像素点, 即得到了无伪影的大景深图像. 上述算法流程如图 5 所示. 图中  $i_{\text{final}}^+$  和  $i_{\text{final}}^-$  分别表示正向和负向离焦  $\delta W_d$  时对应的无伪影最终解码图像, 为了进一步提升最终解码图像的信噪比, 对二者进行了平均.

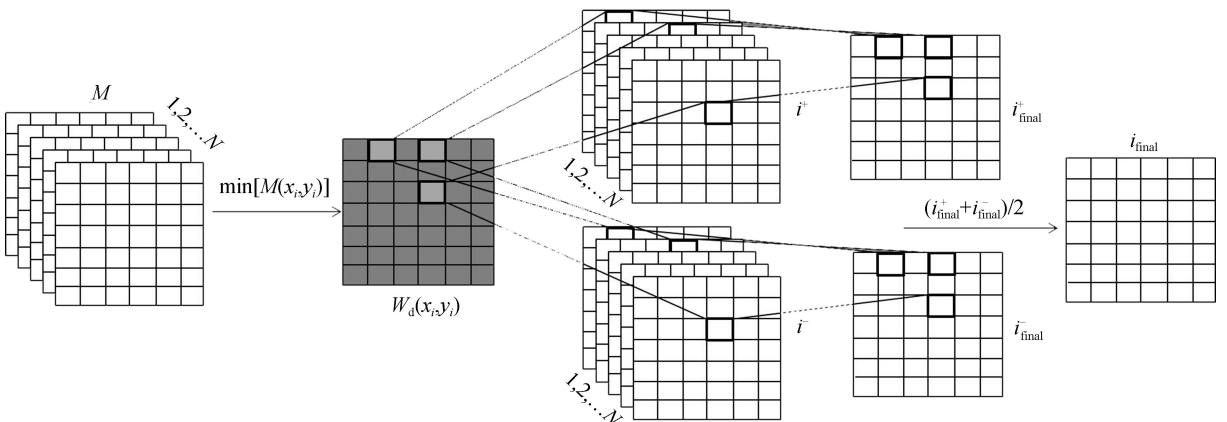


图 5 离焦像差图的获取及解码图像重建流程

Fig.5 Process to obtain the defocus map and decoding image

通过以上步骤, 可同时获得大景深成像系统景深范围内的大景深无伪影的解码图像和目标的离焦像差图. 此外, 上述计算过程是基于单个像素的, 因此理论上目标的二维离焦量和大景深无伪影图像都可精确到像素级.

### 2.3 基于大景深成像系统的目标离焦量测定实验

为了验证前述方法的有效性, 实验时取  $\delta W_d$  为  $\lambda/4$ , 记录两组 65 个 2.1 节所示三次相位板成像系统在

$[-4\lambda, 4\lambda]$  离焦像差范围内的点扩散函数, 一组对应三次相位板横向正方向偏移情形, 用以对离焦  $\delta W_d$  时的中间编码图像  $r_c^+$  进行解码, 另一组对应三次相位板横向负方向偏移时的情形, 用以对离焦  $-\delta W_d$  时的中间编码图像  $r_c^-$  进行解码. 上述两组点扩散函数如图 6 所示.

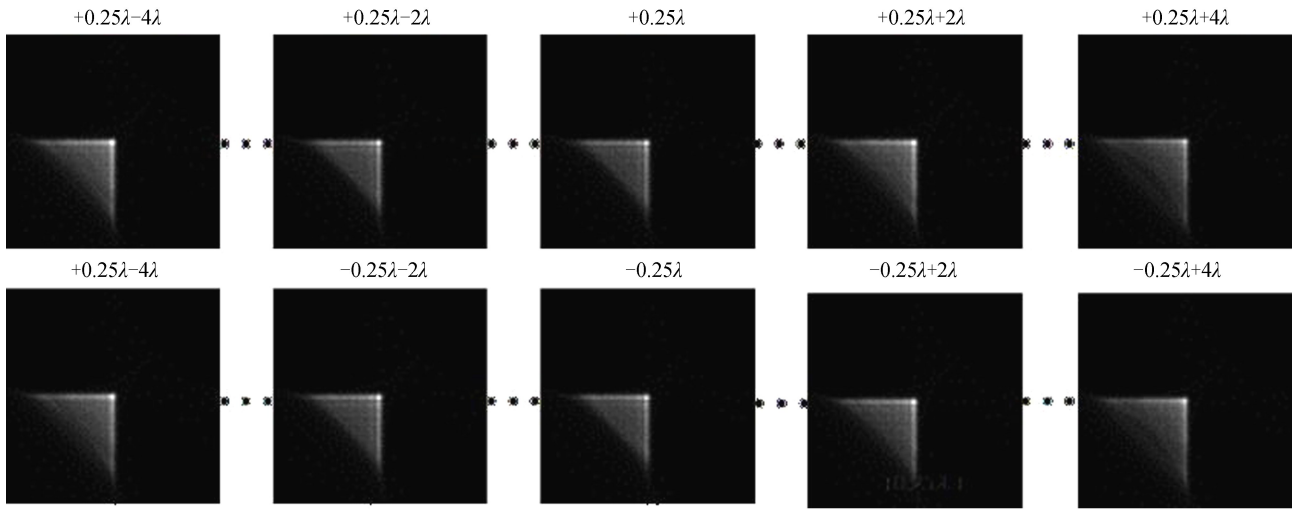


图 6 不同离焦像差情况下大景深成像系统的点扩散函数

Fig.6 The point spread functions of extended depth-of-field imaging system in different defocus values

使用 2.1 节所示的成像系统对如图 7 所示的台阶状物体进行成像, 系统调焦至 2 m 位置, 由台阶状物体引起的成像系统最大离焦像差为  $+4\lambda$ , 最小离焦像差为  $-4\lambda$ .

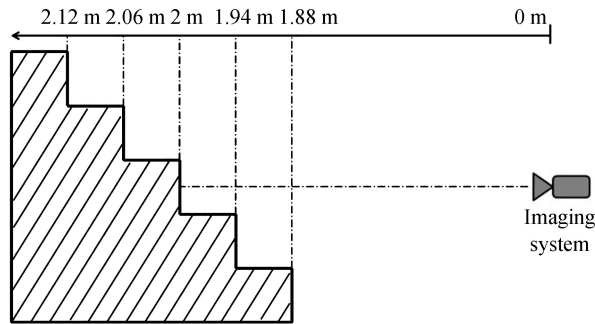


图 7 台阶状物体成像示意图

Fig.7 Schematic of imaging a step-like object

结合上述成像条件下的目标距离信息, 依据牛顿公式可计算出台阶状物体在像面的实际离焦量, 如图 8(a) 所示, 为了便于对比, 同时给出了由本文所提出的离焦量测定方法获得的结果图, 如图 8(b) 所示, 图中数值的单位为波长  $\lambda$ .

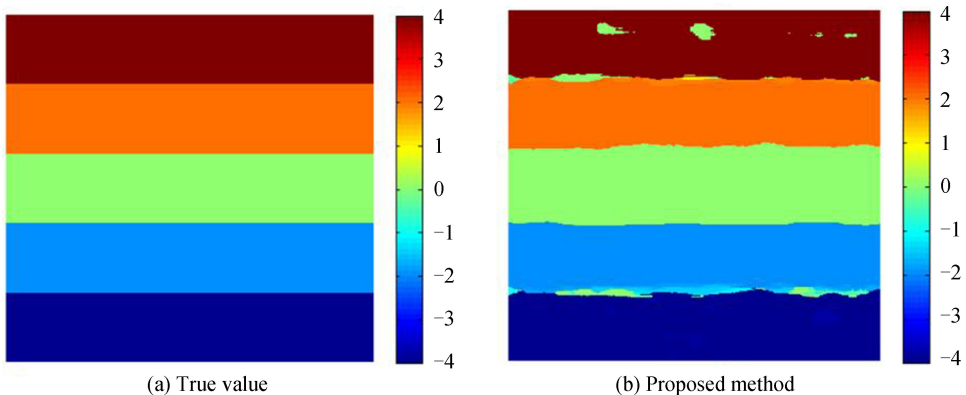


图 8 离焦量对比图

Fig.8 Comparisons of object defocus maps between the true value and that obtained with the proposed method

从图 8 可以看出,所提出的目标离焦量测定方法不但可给出目标离焦量的大小,同时可以给出其正负号.通过离焦量和像方离焦距离间的关系式(14),结合像方和物方的距离换算关系可得到目标的实际距离、计算距离和它们的差值如图 9 所示.

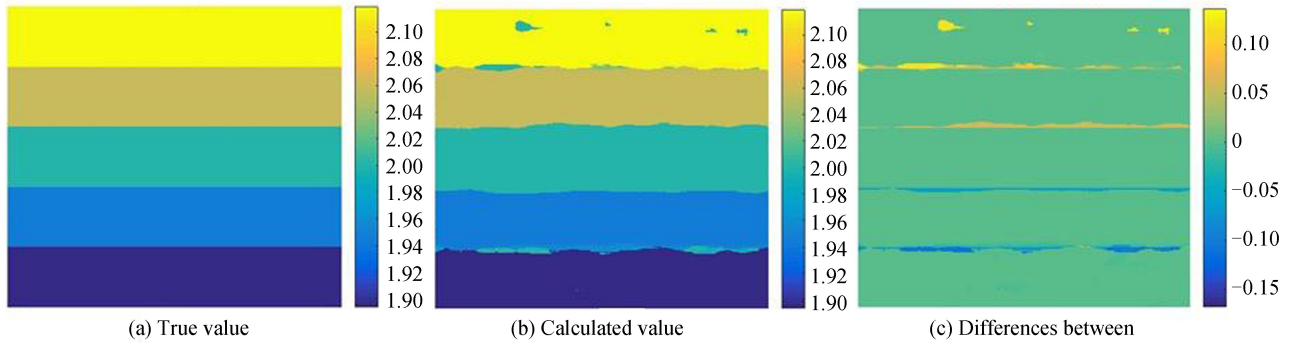


图 9 目标距离对比图

Fig.9 Comparisons of object range maps between the true value and that obtained with the proposed method

从图 9 可知,根据前述计算所得的目标离焦量,可反算出较为准确的目标距离信息.通过真实值和计算值之间的差异,可看出在上述实验条件下所提出的方法对目标的最大距离测算误差在 0.15 m 以内.

在前述所获得的目标的离焦量之后,可采用 2.2 节中解码图像重建算法进一步对大景深成像系统的中间编码图像进行解码,其结果图如图 10(c)所示,为了对比成像效果,同时给出了在上述同等成像条件下,传统成像系统和三次相位板大景深成像系统的成像结果图,分别如图 10(a)、10(b)所示.为了对三次相位板成像和所提方法重建的结果图像进行客观评价,在图中给出了其各自的信噪比值( $SNR = 20 \log_{10}(\text{mean}/\text{std})$ ,其中 mean 为图像的均值, std 为图像的标准差).

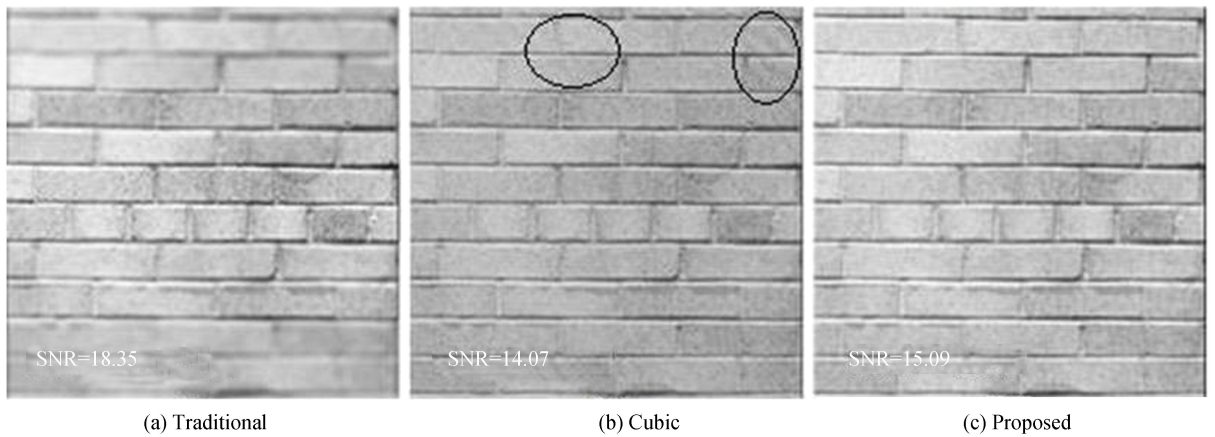


图 10 不同成像系统成像效果对比图

Fig.10 Comparisons of results obtained with different imaging systems

从图 10 可以看出,传统成像系统的信噪比高,但是其只能对有限范围的目标清晰成像.相比于传统成像系统,三次相位板有效扩展了成像系统的景深范围,对传统成像系统景深范围外的区域能够清晰成像,但是在其解码图像中伴随伪影现象(黑色椭圆圈内),而由本文提出的目标离焦量测定方法重建的结果图不但具有与三次相位板相同的景深扩展能力,其解码图像信噪比高,而且在图中不再含有伪影现象.

此外,为了便于理论分析、计算和实验验证,本文以三次相位板为例进行说明,但是本文所提出的方法同样适用于其他类型的奇对称型相位板.

### 3 结论

利用菲涅尔积分法建立了三次相位板横向偏移量与轴向离焦像差之间的函数关系,提出了采用横向偏移相位板的方法实现特定大小的轴向离焦.分析了三次相位板景深延拓成像系统解码图像中的伪影现象,结

合 CKM 方法,提出采用横向偏移相位板的方法来替换 CKM 方法中的理想像面的人为离焦,降低人为轴向偏移理想焦面引入的误差.设计了大景深成像系统,详细论述了大景深成像系统中目标离焦量的测定算法,并给出了成像实验结果.实验结果表明,所提出的目标离焦量测定方法不但可获得较为准确的带符号的离焦像差图,而且可以获得大景深、无伪影的目标图像,进而可计算出目标的距离信息.文中虽然以三次相位板为例进行分析,但是相关理论和方法同样适用于其他类型的奇对称型相位板.将原来奇对称型相位板景深延拓成像系统解码图像中的不利因素—伪影转化为衡量离焦像差的标准,从而在减轻解码图像中伪影干扰的同时额外获得了目标的离焦像差图,这进一步拓展了奇对称型相位板景深延拓成像系统在实际应用中的范围,并提高了其最终解码图像质量.

## 参考文献

- [1] DOWSKI E R, CATHEY W T. Extended depth of field through wave-front coding[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(11): 1859-1866.
- [2] ZHAO H, LI Y C. Optimized logarithmic phase masks used to generate defocus invariant modulation transfer function for wavefront coding system[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(15): 2630-2632.
- [3] YANG Q G, LIU L R, SUN J F. Optimized phase pupil masks for extended depth of field[J]. *Optics Communications*, 2007, **272** (2007): 56-66.
- [4] CARON N, SHENG Y. Polynomial phase masks for extending the depth of field of a microscope[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(22): E39-E43.
- [5] ZHOU F, LI W G, ZHANG H T, *et al.* Rational phase mask to extend the depth of field in optical-digital hybrid imaging systems[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(3): 380-382.
- [6] ZHAO H, LI Y C. Optimized sinusoidal phase mask to extend the depth of field of an incoherent imaging systems[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(2): 267-269.
- [7] 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.
- [8] LE V N, FAN Z G, MINH N P, *et al.* Optimized square-root phase mask to generate defocus-invariant modulation transfer function in hybrid imaging systems[J]. *Optical Engineering*, 2015, **54**(3): 035103.
- [9] ZHOU L, LIU Z H, SHE W J, *et al.* Inverse sinusoidal phase mask to extend the depth of field of incoherent imaging systems[J]. *Optik*, 2016, **127**(2016): 9105-9110.
- [10] VETTENBURG T, BUSTIN N, HARVEY A R. Fidelity optimization for aberration-tolerant hybrid imaging systems [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(9): 9220-9228.
- [11] ZHOU Liang, LIU Zhao-hui, SHE Wen-ji. Combined analysis of tunable phase mask within spatial and frequency domain[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(22): 224207.  
周亮, 刘朝晖, 折文集. 可调谐相位板空域频域联合分析[J]. *物理学报*, 2015, **64**(22): 224207.
- [12] DEMENIKOV M, HARVEY A R. A technique to remove image artefacts in optical systems with wavefront coding[C]. SPIE, 2009, **7429**: 7429N.
- [13] ZAMMIT P, HARVEY A R, CARLES G. Extended depth-of-field imaging and ranging in a snapshot[J]. *Optica*, 2014, **1**(4): 209-216.
- [14] ZAMMIT P, CARLES G, HARVEY A R. 3D imaging and ranging in a snapshot[C]. SPIE, 2016, **9630**: 963004.
- [15] ZHOU Y Z, ZAMMIT P, HARVEY A R. 3D microfluidic particle image velocimetry with extended depth-of-field and a single camera[C]. *3D Image Acquisition and Display: Technology, Perception and Applications*, Optical Society of America, 2016: JT3A.40.

**Foundation item:** The National High Technology Research and Development Program of China (No. 2013AA7088047) and the CAS "Light of West China" Program (No. XAB2017B27)

引用格式: ZHOU Liang, LIU Zhao-hui, SHAN Qiu-sha, *et al.* Measurement of the Object Defocus with Extended Depth-of-field Imaging System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(10): 1011003

周亮, 刘朝晖, 单秋莎, 等. 大景深成像系统中目标离焦量的测定[J]. *光子学报*, 2018, **47**(10): 1011003