

文章编号: 0253-2239(2008)08-1457-06

# 数字无透镜傅里叶变换全息术中非傍轴及离焦像差的校正

姜宏振 赵建林 邸江磊 闫晓博 孙伟伟

(西北工业大学理学院光信息技术研究所陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072)

**摘要** 对数字无透镜傅里叶变换全息图直接采用逆傅里叶变换进行物场的数值重建时,需要满足两个条件:第一,全息图的记录过程必须满足傍轴近似条件,否则再现过程中会产生非傍轴像差;第二,记录全息图时物平面与参考点光源到全息图记录平面的距离必须相等,否则再现过程中会产生离焦像差。理论分析了非傍轴及离焦记录条件下数字无透镜傅里叶变换全息图的灰度分布特点,并提出了相应的非傍轴及离焦像差的数值校正方法。根据实际的非傍轴或离焦记录情况,分别给所记录的数字全息图灰度分布矩阵乘以适当的非傍轴或离焦校正因子,以消除灰度矩阵中非傍轴或离焦因素的影响,然后再对校正后的全息图灰度矩阵做逆傅里叶变换处理,即可得到准确的数字再现像。实验结果表明,该数值重建方法能够有效地消除无透镜傅里叶变换全息术中数字再现像的非傍轴像差及离焦像差,提高再现像的质量。

**关键词** 数字全息术; 无透镜傅里叶变换全息图; 非傍轴像差; 离焦像差; 数值重建

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082808.1457

## Correction of Nonparaxial and Misfocus Aberrations in Digital Lensless Fourier Transform Holography

Jiang Hongzhen Zhao Jianlin Di Jianglei Yan Xiaobo Sun Weiwei

(Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

**Abstract** In digital lensless Fourier transform holography, performing inverse Fourier transform directly to the digital hologram for the numerical reconstruction of the object field requires two conditions. Firstly, the paraxial approximation condition must be satisfied in the recording process of the hologram, otherwise a nonparaxial aberration will be produced in the reconstruction process. Secondly, the distances from the object plane and the reference point source to the recording plane of the hologram must be equal, or else a misfocus aberration will be produced in the reconstruction process. The grayscale distribution of the digital lensless Fourier transform holograms recorded under the condition of nonparaxiality or misfocus is analyzed in theory, and corresponding numerical correction methods for nonparaxial or misfocus aberration are introduced, respectively. According to the actual recording conditions, if using proper correction factors for nonparaxiality or misfocus to multiply the grayscale distribution matrix of the recorded digital hologram, the influence of the nonparaxiality or misfocus can be removed. Accurate digital reconstructed image will be obtained by performing inverse Fourier transform directly to the corrected hologram grayscale matrix. The experimental results show that the introduced numerical reconstruction methods can well correct the nonparaxial or misfocus aberration and thus improve the quality of the digital reconstructed image in digital lensless Fourier transform holography.

**Key words** digital holography; lensless Fourier transform hologram; nonparaxial aberration; misfocus aberration; numerical reconstruction

收稿日期: 2007-11-19; 收到修改稿日期: 2008-02-26

基金项目: 航空科学基金(2006ZD53042)资助课题。

作者简介: 姜宏振(1984—),男,博士研究生,主要从事数字全息术方面的研究。E-mail: jiangleidi@nwpu.edu.cn

导师简介: 赵建林(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事光信息技术及应用等方面的研究。

E-mail: jlzha@nwpu.edu.cn

# 1 引 言

数字无透镜傅里叶变换全息术<sup>[1~9]</sup>综合了无透镜傅里叶变换全息术和数字全息术<sup>[10~13]</sup>的优点,其物场重建过程简单,所记录的数字全息图仅通过一次逆傅里叶变换处理即可获得物场的数字全息再现像。但是,对无透镜傅里叶变换全息图直接通过逆傅里叶变换处理,是根据菲涅耳衍射积分对全息图在理想条件下(即傍轴以及物体与参考点光源准确共面)的记录过程进行分析的结果。当所记录的数字无透镜傅里叶变换全息图的尺寸较大或者记录距离较近,而使傍轴近似条件不满足时,对其直接进行数字逆傅里叶变换处理所获得的全息再现像将存在非傍轴像差;其次,当被记录物体与参考点光源不能准确位于同一平面上时,对其直接进行数字逆傅里叶变换处理所获得的数字全息再现像将存在离焦像差。若在数值重建过程中严格按照瑞利-索末菲衍射积分式,对于非傍轴条件下记录的无透镜傅里叶变换全息图进行数值计算,则相应的非傍轴像差可以得到避免,但由于运算过程复杂,需要耗费大量的运算时间。因此,需要寻找一种合适的数值重建方法,使其既能够满足按照瑞利-索末菲衍射积分式进行数值计算时的准确性,同时又具有使用数字逆傅里叶变换处理进行数值计算的便捷性。对于离焦像差,目前主要是通过实验手段加以校正,即在实验过程中分别量取物体以及参考光点源到全息图记录平面的距离并尽量使其相等,再根据再现结果对参考点光源和物体的位置进行微调。这需要反复调整参考点光源和物体的位置,繁琐复杂,并且不能保证参考点光源和物体到全息图的距离绝对相等。

本文主要分析非傍轴及离焦记录条件下数字无透镜傅里叶变换全息图的灰度分布特点,在此基础上提出相应的非傍轴及离焦像差的数值校正方法,并给出实验验证结果。

# 2 原 理

## 2.1 非傍轴像差的产生及其校正

图1所示为无透镜傅里叶变换全息图的记录原理,设物平面  $O$  和全息图记录平面  $H$  分别位于  $x_0y_0$  和  $xy$  平面,两平面之间的距离为  $d$ ,被记录物体  $Q$  与参考点光源在物平面上的间距为  $b$ 。在数字全息图的记录过程中,所记录物体的横向尺寸受记录条件(如物体到参考点源的距离、CCD 的空间分辨率等)的限制一般远小于全息图的记录距离,满足傍轴

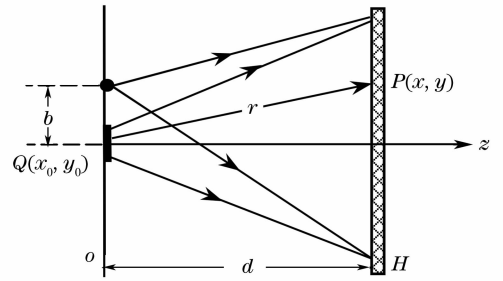


图1 无透镜傅里叶变换全息图的记录原理  
Fig. 1 Recording principle of the lensless Fourier transform hologram

近似条件。但是当全息图的横向尺寸较大而与全息图的记录距离相比不可忽略时,则仍有可能使所记录的全息图偏离傍轴近似条件  $d^3 \gg [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]/4\lambda$ 。此时直接利用菲涅耳衍射积分式对全息图记录过程的描述已不再合适,需要直接采用标量衍射理论中严格满足波动方程的瑞利-索末菲衍射积分式。假设物光波在物平面处的复振幅分布为  $O(x_0, y_0)$ ,则其在全息图记录平面上的复振幅分布  $U(x, y)$  可表示为

$$U(x, y) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\Sigma} O(x_0, y_0) \frac{\exp(jkr)}{r} \frac{d}{r} dx_0 dy_0, \quad (1)$$

式中  $r$  为物点  $Q(x_0, y_0)$  到全息图记录平面上观察点  $P(x, y)$  之间的距离。根据数字无透镜傅里叶变换全息图记录过程的特点,取被记录物体的横向尺寸远小于全息图的记录距离,则  $r$  可以近似表示为

$$r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + d^2} \approx (x^2 + y^2 + d^2)^{1/2} \left( 1 - \frac{xx_0 + yy_0}{x^2 + y^2 + d^2} \right), \quad (2)$$

取

$$\begin{aligned} f_x &= x/\lambda(x^2 + y^2 + d^2)^{1/2}, \\ f_y &= y/\lambda(x^2 + y^2 + d^2)^{1/2}, \end{aligned} \quad (3)$$

将(2)式和(3)式结果代入(1)式,得

$$\begin{aligned} U(x, y) &= \frac{d \exp[jk(x^2 + y^2 + d^2)^{1/2}]}{j\lambda(x^2 + y^2 + d^2)} \times \\ &\iint_{\Sigma} O(x_0, y_0) \exp\left[-jk \frac{xx_0 + yy_0}{(x^2 + y^2 + d^2)^{1/2}}\right] dx_0 dy_0 = \\ &\frac{d \exp[jk(x^2 + y^2 + d^2)^{1/2}]}{j\lambda(x^2 + y^2 + d^2)} O'(f_x, f_y), \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $O'(f_x, f_y)$  表示  $O(x_0, y_0)$  的傅里叶变换。同样可以得到参考点光源在全息图记录平面上的复振幅分布为

$$R(x, y) = \frac{d \exp[jk(x^2 + y^2 + d^2)^{1/2}]}{j\lambda(x^2 + y^2 + d^2)} C, \quad (5)$$

式中  $C = \exp(j2\pi f_y b)$  为物平面上点光源所对应的  $\delta$  函数的傅里叶变换。由此得全息图记录平面上干涉光场的强度分布为

$$I(x, y) = |U(x, y) + R(x, y)|^2 = \frac{d^2}{\lambda^2(x^2 + y^2 + d^2)^2} [C^* O'(f_x, f_y) + CO'^*(f_x, f_y) + |C|^2 + |O'(f_x, f_y)|^2], \quad (6)$$

(6)式实际上就是在非傍轴条件下所记录的数字无透镜傅里叶变换全息图的灰度分布。(6)式中等号右端括号外因子的存在,表明全息图记录过程存在非傍轴像差,因此该像差的消除也必须从(6)式出发。显然,对数字全息图灰度分布矩阵  $I(x, y)$  乘以校正因子  $\lambda^2(x^2 + y^2 + d^2)^2/d^2$ , 就可以消除(6)式中的非傍轴像差因子,得到校正的全息图灰度分布矩阵。然后对校正后的全息图灰度分布矩阵进行如(3)式所示的坐标变换,得到其在频谱坐标系  $(f_x, f_y)$  下的对应矩阵表示,进而对该矩阵进行数字逆傅里叶变换,即可以得到物光波场复振幅分布  $O(x_0, y_0)$  的准确重建。

需要说明的是,上述数值校正方法中引入瑞利-索末菲衍射积分对全息图的记录过程进行分析,考虑了非傍轴记录条件对全息图灰度分布的影响,同时又根据数字无透镜傅里叶变换全息图记录过程的特点作了一定的合理近似,使之能够利用数字逆傅里叶变换进行快速计算,从而能够便捷地获得在该记录条件下的准确数字再现像,并提高所记录物体尤其是其中精细结构(其对应的物光衍射角较大,因而偏离傍轴条件也较大)的成像质量。

### 2.2 离焦像差的产生及其校正

如图2所示,设物体  $Q$  与参考点光源  $S$  不在同一垂轴平面上,物平面和参考点光源到全息图记录平面的距离分别为  $d_1$  和  $d_2$ , 且  $d_1 - d_2 = \Delta d$ , 物平面上的光场复振幅分布为  $O(x_0, y_0)$ , 则在全息图记

录平面上物光及参考光的复振幅分布分别为

$$u(x, y) = C_1 \exp\left[j \frac{k}{2d_1}(x^2 + y^2)\right] O'(f_x, f_y), \quad (f_x = x/\lambda d_1, \quad f_y = y/\lambda d_1), \quad (7)$$

$$r(x, y) = R_0 \exp\left[j \frac{k}{2d_2}(x^2 + y^2)\right] \times \exp\left[j2\pi \frac{yb}{\lambda d_2}\right], \quad (8)$$

式中  $C_1 = \exp(j2\pi d_1/\lambda)/j\lambda d_1$ ,  $O'(f_x, f_y)$  为  $O(x_0, y_0) \exp[j\pi(x_0^2 + y_0^2)/\lambda d_1]$  的傅里叶变换,  $R_0$  为常数, 则两光波在全息图记录平面上的叠加光强分布为

$$I(x, y) = |u(x, y) + r(x, y)|^2 = uu^* + R_0^2 + ur^* + u^*r, \quad (9)$$

$ur^*$  项为

$$u(x, y)r^*(x, y) = C_1 \exp\left[j \frac{k}{2} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}\right)(x^2 + y^2)\right] \times O'(f_x, f_y) \exp\left[-j2\pi \frac{yb}{\lambda d_2}\right], \quad (10)$$

上式表明,当  $d_1 = d_2$  时,对全息图直接进行逆傅里叶变换处理即可得到傍轴近似下物光波场的复振幅分布  $O(x_0, y_0) \exp[j\pi(x_0^2 + y_0^2)/\lambda d_1]$ ; 当  $d_1 \neq d_2$  时,由于二次相位因子  $\exp[jk/2(1/d_1 - 1/d_2)(x^2 + y^2)]$  的存在,对全息图直接进行逆傅里叶变换处理将使得再现像中存在离焦像差。可以看出,若对数字全息图灰度分布矩阵  $I(x, y)$  乘以离焦校正因子  $\exp[jk/2(1/d_2 - 1/d_1)(x^2 + y^2)]$ , 然后对校正后的全息图灰度分布矩阵求逆傅里叶变换,即可得到物光波场的复振幅分布  $O(x_0, y_0) \exp[j\pi(x_0^2 + y_0^2)/\lambda d_1]$ 。这里的二次相位因子  $\exp[j\pi(x_0^2 + y_0^2)/\lambda d_1]$  仅对再现像的相位分布产生影响,并不影响再现像的强度分布。

然而,在对数字无透镜傅里叶变换全息图灰度分布矩阵引入离焦像差校正因子时,还需要对再现像的离焦程度进行判断,以得到准确在焦的物场再现像。数字全息再现像的离焦程度可由其复振幅模值的积分值大小确定。对于纯振幅型物体,两者成正比关系,因此可以认为当该积分值达到最小值时,再现像准确在焦<sup>[14]</sup>。

参考图2,现以参考点光源到全息图记录平面的距离  $d_2$  作为全息图的记录距离,则物平面到全息图记录平面的距离  $d_1 = d_2 + \Delta d$ , 由(10)式可得,此时的离焦像差校正因子为

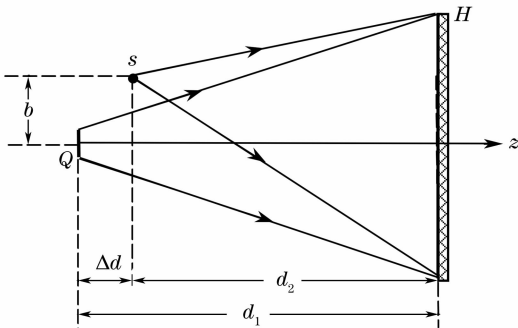


图2 离焦条件下无透镜傅里叶变换全息图的记录  
Fig. 2 Recording of the lensless Fourier transform hologram under misfocus condition

$$K = \exp\left[j \frac{k}{2} \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_2 + \Delta d}\right) (x^2 + y^2)\right], \quad (11)$$

取  $\Delta d = m \times \xi$ , 其中  $m$  为步进校正参量,  $\xi$  为每次改变的离焦量步进值。选取合适的离焦量步进值  $\xi$ , 通过改变  $m$  值对离焦量  $\Delta d$  进行调整, 计算不同离焦量  $\Delta d$  所对应的离焦像差校正因子  $K$ , 然后对全息图灰度分布矩阵分别进行相应的离焦像差校正后获得数字再现像。计算不同全息再现像的复振幅模值的积分值  $M$ , 通过曲线拟合获得离焦量  $\Delta d$  与积分值  $M$  的关系曲线, 则该曲线上积分值  $M$  最小值点所对应的离焦量  $\Delta d$  即为最佳离焦像差校正距离, 使用该距离对全息图灰度分布矩阵重新进行离焦像差校正, 即可获得准确在焦的数字全息再现像。

上述数值校正方法根据离焦记录条件下数字无透镜傅里叶变换全息图的灰度分布特点, 通过循环步进计算实现了离焦像差的自动数值校正, 从而得到准确在焦的数字全息再现像, 避免了通过实验手段(反复微调参考点光源及物体位置)修正离焦像差的繁琐性。

### 3 数值校正结果

利用线阵 CCD 推扫方式, 实验获得大幅面数字

无透镜傅里叶变换全息图, 根据上述数值重建方法, 对该数字全息图的非傍轴像差及离轴像差分别进行校正。所用线阵 CCD 共有 5000 pixel, 像素间隔为  $7 \mu\text{m}$ , 故所记录的全息图的大小为  $3.5 \text{ cm} \times 3.5 \text{ cm}$ , 像素数目为 5000 (H)  $\times$  5000 (V)。实验中, 取照射光波长为 632.8 nm, 全息图的记录距离分别为 14 cm 和 37.5 cm, 物体面积大小为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的透射型分辨率板(相当于纯振幅型物体)。

#### 3.1 非傍轴像差的数值校正结果

所要校正的数字全息图的记录距离为 14 cm。由计算可知, 该全息图的记录过程已不满足傍轴近似条件, 应当按照上述非傍轴记录条件下全息图的数值重建方法进行数值重建, 以对再现像中的非傍轴像差进行校正。图 3 为数值校正结果, 其中: 图 3(a) 为对原始数字全息图直接通过逆傅里叶变换所得到的全息再现像; 图 3(b) 为对图 3(a) 中标记区域的放大像; 图 3(c) 为经过非傍轴像差校正后所得到的相应区域的全息再现像; 图 3(d) 为由 CCD 直接拍摄得到的相应区域的实物图; 图 3(e)~图 3(g) 分别显示了图 3(b)~图 3(d) 中纵向(图中虚线方向)的强度分布。通过比较可以发现, 修正后的再现结果的强度分布与原物的强度分布较为一致。

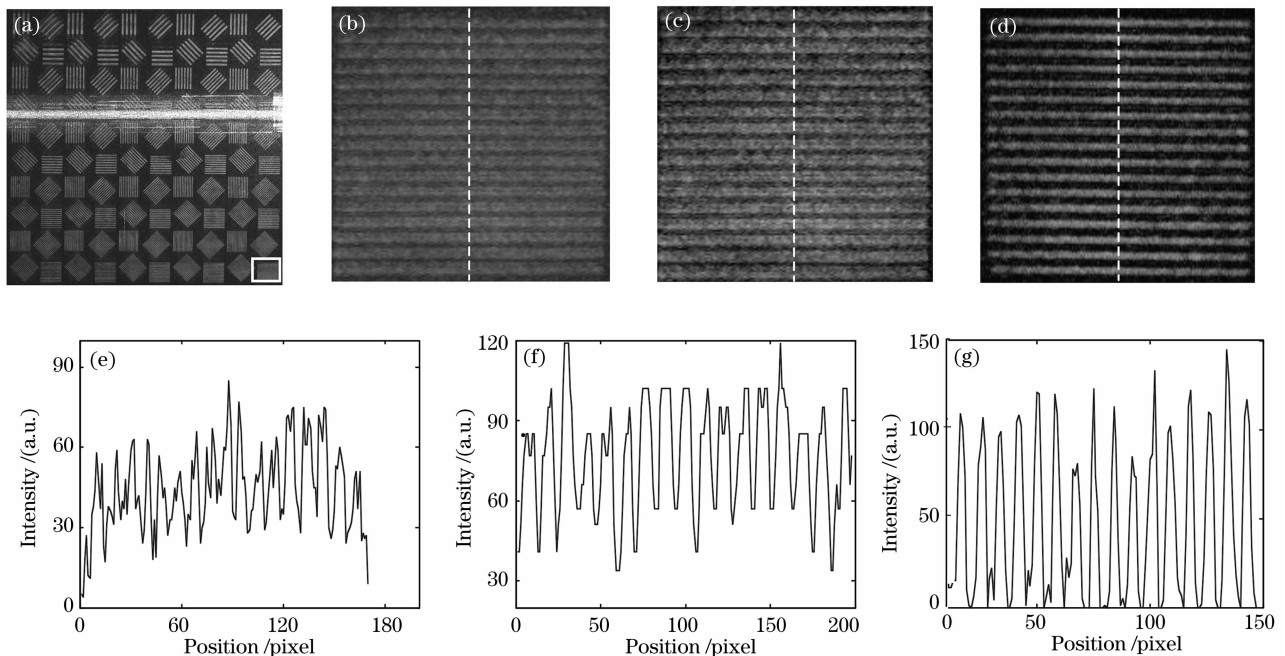


图 3 非傍轴像差的数值校正结果。(a) 原始数字无透镜傅里叶变换全息图的再现像, (b) 图(a)中标记区域的放大像, (c) 相应区域的数值校正再现像, (d) 相应区域实物图, (e)~(g) 对应图(b)~(d)中沿虚线方向的强度分布

Fig. 3 Numerical correction results of nonparaxial aberration. (a) Reconstructed image by original digital lensless Fourier transform hologram, (b) magnification of the marked area in (a), (c) reconstructed image of the corresponding area after correction, (d) image of the corresponding area, (e)~(g) intensity distribution along with the dashed lines in (b)~(d)

### 3.2 离焦像差的数值校正结果

数字全息像的景深  $\Delta l$  受到 CCD 靶面横向尺寸  $L$  和全息图记录距离  $d$  的限制, 其关系为:  $\Delta l = 2d^2\lambda / (L^2 - 2d\lambda)^{[15]}$ 。当景深较小时, 离焦像差对全息图再现像质量的影响较为明显。实验中取全息图的记录距离为 37.5 cm, 全息图大小为 3.5 cm  $\times$  3.5 cm, 经计算知, 全息再现像的景深约为 0.015 cm, 按照所述离焦像差的数值校正方法, 通过曲线拟合得到如图 4 所示离焦量  $\Delta d$  与再现像复振幅模值的积分值  $M$  之间的关系曲线, 其中所选取的离焦量步进值  $\xi = 0.01$  cm, 步进校正参量  $m$  的取值范围为  $[-6, 6]$ 。

从图 4 中的拟合曲线可以得到, 当步进校正参量  $m = -3.55$  时, 再现像复振幅模值的积分值  $M$  最小。根据理论分析, 此时所得到的  $\Delta d = -0.0355$  cm 应为最佳离焦像差校正距离, 按照此距离进行离焦校正所获得的再现像的清晰度最高。当离焦像差校正距离偏离此最佳距离时, 再现像会发生离焦, 清晰度降低。

图 5 为不同校正距离下所获得的离焦像差校正再现像, 其中图 5(a)~图 5(c)分别为离焦像差校正

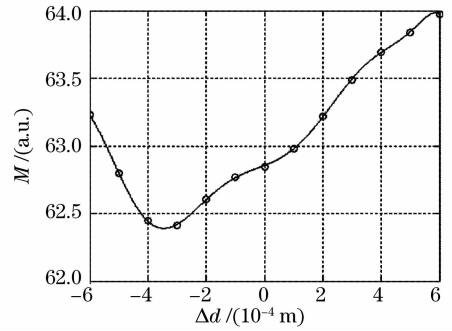


图 4 离焦量  $\Delta d$  与再现像复振幅模值的积分值  $M$  之间的关系

Fig. 4 Relationship of the amplitude modulus integral  $M$  of the reconstructed image and the misfocus distance  $\Delta d$

距离  $\Delta d = -0.06$  cm、 $-0.0355$  cm、 $0.06$  cm 时所获得的数字全息再现像, 图 5(d)~图 5(f)分别为对图 5(a)~图 5(c)中标记区域的放大像。从图可以看出, 再现像从模糊到清晰再到模糊的变化过程与理论分析结果相吻合。当离焦像差校正距离  $\Delta d = -0.0355$  cm 时, 再现像的清晰度最高, 此时离焦像差已几乎得到完全校正。

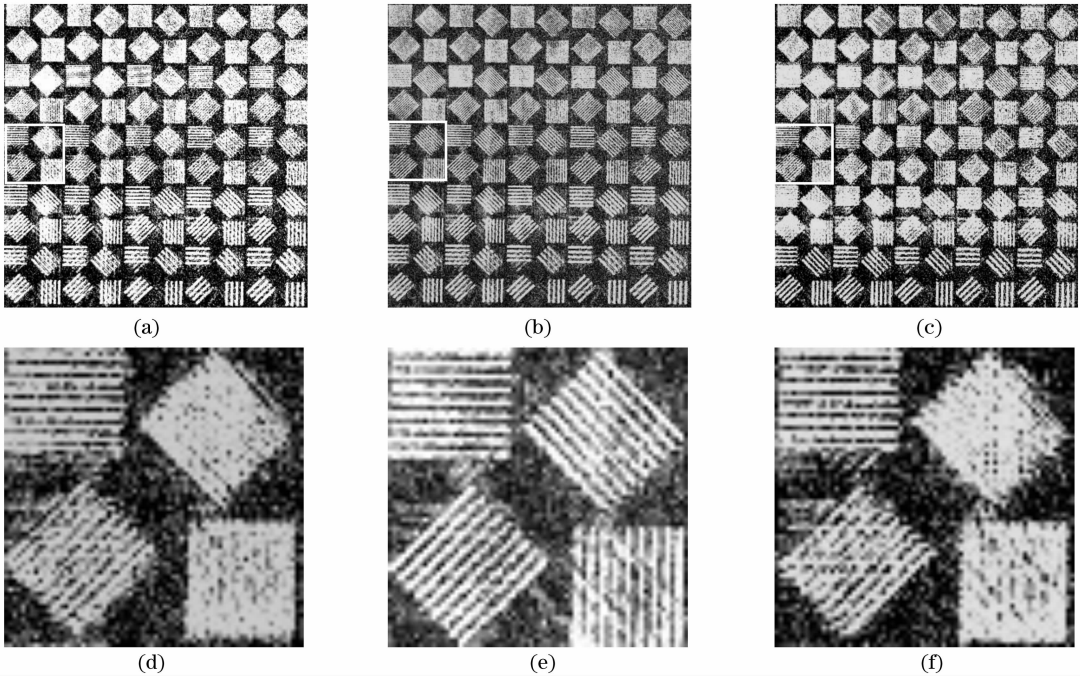


图 5 不同离焦像差校正距离下所获得的数字再现。(a)  $\Delta d = -0.06$  cm, (b)  $\Delta d = -0.0355$  cm, (c)  $\Delta d = 0.06$  cm, (d) 图(a)中标记区域的放大像, (e) 图(b)中标记区域的放大像, (f) 图(c)中标记区域的放大像

Fig. 5 Numerical reconstructed images with different misfocus correction distances. (a)  $\Delta d = -0.06$  cm, (b)  $\Delta d = -0.0355$  cm, (c)  $\Delta d = 0.06$  cm, (d), (e), (f) magnification of the marked areas in (a), (b) and (c), respectively

## 4 结 论

对数字无透镜傅里叶变换全息图直接采用逆傅

里叶变换进行物场的数值重建时, 需要满足两个条件。通过理论分析非傍轴及离焦记录条件下数字无

透镜傅里叶变换全息图的灰度分布特点发现,分别给所记录的数字全息图灰度分布矩阵乘以适当的非傍轴或离焦校正因子,即可以消除灰度矩阵中非傍轴或离焦因素的影响,然后再对校正后的全息图灰度矩阵做逆傅里叶变换处理,即可得到准确的数字再现像。实验结果表明,该数值重建方法能够有效地消除无透镜傅里叶变换全息术中数字再现像的非傍轴像差及离焦像差,从而获得准确的数字全息再现像,提高再现像的质量。

### 参 考 文 献

- 1 C. Wagner, S. Seebacher, W. Osten *et al.*. Digital recording and numerical reconstruction of lensless Fourier holograms in optical metrology[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(22): 4812~4820
- 2 S. Takao, S. Yoneyama, M. Takashi. Minute displacement and strain analysis using lensless Fourier transformed holographic interferometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, **38**(5): 233~244
- 3 D. Dirksen, H. Droste, B. Kemper *et al.*. Lensless Fourier holography for digital holographic interferometry on biological samples[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, **36**(3): 241~249
- 4 G. Pedrini, H. J. Tiziani. Short-coherence digital microscopy by use of a lensless holographic imaging system[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22): 4489~4496
- 5 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu *et al.*. Analysis of the characteristics about the digital holography of the spherical reference wave[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1209~1213  
钟丽云,张以谟,吕晓旭等. 球面参考光波数字全息的一些特点分析及实验[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1209~1213
- 6 Xu Ying, Zhao Jianlin, Xiang Qiang *et al.*. Image processing in numerical reconstruction for lensless Fourier transform hologram[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1503~1506  
徐莹,赵建林,向强等. 无透镜傅里叶变换全息图数值再现中的图像处理[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1503~1506
- 7 Lü Xiaoxu, Zhang Yimo, Zhong Liyun *et al.*. Analysis and experiment of phase-shifting coaxial lensless Fourier digital holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1511~1515  
吕晓旭,张以谟,钟丽云等. 相移同轴无透镜傅里叶数字全息的分析与实验[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1511~1515
- 8 Yuan Caojin, Zhai Hongchen, Wang Xiaolei *et al.*. Three-dimensional surface contouring of reflecting micro-object by digital holography with short-coherence light source[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(1): 218~223  
袁操今,翟宏琛,王晓雷等. 采用短相干数字全息术实现反射型微小物体的三维形貌测量[J]. *物理学报*, 2007, **56**(1): 218~223
- 9 Chujun Zheng, Peng Han, Hongsen Chang. Four-quadrant spatial phase-shifting Fourier transform digital holography for recording of cosine transform coefficients[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(3): 145~147
- 10 U. Schnars, W. P. O. Juptner. Digital recording and numerical reconstruction of holograms[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2002, **13**(9): 85~101
- 11 Y. Zhang, Q. Lü, B. Ge *et al.*. Digital holography and its application[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5636**: 200~211
- 12 Di Jianglei, Zhao Jianlin, Fan Qi *et al.*. Phase correction of wavefront reconstruction in digital holographic microscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 56~61  
邸江磊,赵建林,范琦等. 数字全息显微术中重建物场波前的相位校正[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 56~61
- 13 Wang Huaying, Wang Guangjun, Zhao Jie *et al.*. Imaging resolution analysis of digital holographic microscopy[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1670~1675  
王华英,王广俊,赵洁等. 数字全息显微系统的成像分辨率分析[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1670~1675
- 14 F. Dubois, C. Schockaert, N. Callens *et al.*. Focus plane detection criteria in digital holography microscopy by amplitude analysis[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(13): 5895~5908
- 15 Liu Cheng, Zhu Jianqiang. Basic characters of digital holographic profiling[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2002, **14**(3): 328~330  
刘诚,朱健强. 数字全息形貌测量的基本特性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(3): 328~330