

一种基于物体微位移的数字全息散斑噪声抑制方法

潘 锋 肖 文

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要 数字全息作为一种相干成像方法,散斑噪声严重影响其成像质量。针对这一问题,提出了一种基于微位移的数字全息散斑噪声抑制方法。在全息记录过程中,通过连续微小平移物体,记录多帧数字全息图。对多帧全息图分别进行数字再现。在再现计算中,利用像差校正算法和图像配准算法,正确校正由于物体微位移造成的复振幅分布差异,以获得多帧具有相同物光场分布,但散斑噪声不相关的再现像复振幅。通过平均叠加多帧再现物光复振幅,有效抑制散斑噪声对再现振幅像和相位像的影响。理论分析与实验结果均表明,该方法是有有效和可行的。

关键词 全息;数字全息;散斑噪声;像差校正;图像配准

中图分类号 TN247;O438;TB877 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s109001

Speckle Noise Reduction in Digital Holography by Slightly Shifting Object

Pan Feng Xiao Wen

(School of Instrumentation Science & Optoelectronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract As a coherent digital holographic imaging method, the speckles noise degrades the image quality. To solve this problem, a method to reduce speckle noise is proposed for digital holography. A series of digital holograms is obtained by shifting object slightly. Each hologram is reconstructed individually, while the differences between these retrieved complex amplitudes due to the object shifting are corrected with phase compensation and image registration algorithms. So all reconstructed complex amplitudes of object have same distribution, but uncorrelated coherent noise patterns. The speckle noise is well suppressed by averaging these reconstructed images. The theory and experimental results prove that the method is effective and feasible.

Key words holography; digital holography; speckle noise; aberration correction; image registration

OCIS codes 090.1995; 090.1000; 110.4280

1 引 言

数字全息基于传统全息原理并借助光电图像探测和计算机图像处理技术,可以定量获取被观测物体的振幅和相位信息,重构物体三维像,近年来备受各国研究者的关注并广泛应用于各个领域^[1~4]。但是,数字全息作为一种相干成像方法,由于物体粗糙表面、光学元件划痕、光路中灰尘等引起的随机散射和多次反射,产生的散斑噪声严重影响成像质量。针对这一问题,各国研究者提出了各种抑制方法。其中一类方法是基于数字图像处理技术,包括:传统滤波法^[5]、维纳滤波法^[6]、离散傅里叶滤波法^[7]和小

波滤波法等^[8]。然而,这些方法存在降低再现像分辨率的不足之处。另外一类方法是以不同方式获取多帧数字全息图,如多波长记录^[9]、改变照明光角度^[10]、旋转参考光偏振态^[11]和多光束斜照射^[12]等,进而通过平均叠加再现像实现散斑噪声抑制。但是,这些方法多适用于抑制振幅像的散斑噪声,而不能用于相位像的散斑噪声抑制。为此,本文提出了一种基于微位移的数字全息散斑噪声抑制方法。即在全息记录中,通过物体连续微小平移获取多帧数字全息图;在数字再现中,各全息图分别进行数字重构,同时利用像差校正算法和图像配准算法,校正由

收稿日期: 2011-03-21; **收到修改稿日期**: 2011-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(31000387)和中央高校基本科研业务费专项资金(YWF-10-02-087)资助课题。

作者简介: 潘 锋(1979—),男,博士,讲师,主要从事基于数字全息的显微观察、相干检测等方面的研究。

E-mail: panfeng@buaa.edu.cn

于物体微位移造成的复振幅分布差异;通过平均叠加再现物光复振幅,实现抑制散斑噪声对再现振幅像和相位像的影响。

2 原 理

采用相干光照明,物体平面 (x, y) 的光场复振幅可以表示为

$$U_b(x, y) = b(x, y)s(x, y), \quad (1)$$

式中 $b(x, y) = A_b(x, y)\exp(i\varphi_b)$ 表示物体反射或透射光场的复振幅分布, $s(x, y) = A_s(x, y)\exp(i\varphi_s)$ 表示随机散射或多次反射引起的无规则复振幅分布,其中 A 和 φ 分别表示光场的振幅和相位。

假设在全息记录过程中,使物体发生一个微小

平移,那么在全息面 (η, ξ) 上物光场的复振幅分布表示为

$$U_h(\xi, \eta) = \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\xi^2 + \eta^2}{2d}\right) \mathcal{F}\left[U_b(x + \Delta x, y + \Delta y) \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x^2 + y^2}{2d}\right)\right], \quad (2)$$

式中 Δx 和 Δy 分别表示物体在物面上沿水平和垂直方向的移动量, λ 为光波长, d 为记录距离, \mathcal{F} 为傅里叶变换。该物光场与参考光在全息面上相干叠加,得到数字全息图并通过数字相机记录。由于相机光敏面通常为矩形窗口,使得部分全息图样被记录。因此,基于该幅全息图再现计算得到的成像面 (x', y') 上物光复振幅表示为

$$U_i(x', y') = C \mathcal{F}\left\{\left[U_h(\xi, \eta) \text{rect}\left(\frac{\xi}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{\eta}{b}\right)\right] \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\xi^2 + \eta^2}{2d}\right)\right\} = \\ C \left[U_b(x + \Delta x, y + \Delta y) \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda} \frac{x^2 + y^2}{2d}\right)\right] * \text{sinc}\left(\frac{ax'}{\lambda d}\right) \text{sinc}\left(\frac{by'}{\lambda d}\right) = \\ C \left[b(x + \Delta x, y + \Delta y) s'(x + \Delta x, y + \Delta y) \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x^2 + y^2}{2d}\right)\right] * \text{sinc}\left(\frac{ax'}{\lambda d}\right) \text{sinc}\left(\frac{by'}{\lambda d}\right). \quad (3)$$

式中 $C = \exp[2i\pi(x'^2 + y'^2)/(2\lambda d)]$, a 和 b 分别为相机光敏面的长和宽,*表示卷积运算。

从(3)式可以看出,用于记录全息图相机的有限孔径使得再现物光复振幅为原始物光场与sinc函数的卷积,其结果是像面上的散斑噪声分布随物体位置的改变而随机变化。因此,通过物体微位移记录多帧全息图,再现复振幅应具有不同的散斑噪声分布,进而通过平均叠加处理,可以抑制散斑噪声。但是,由于全息记录中物体发生了相对位移,成像面上的复振幅会发生相应的波面倾斜和位置偏移。因此,在平均叠加之前需要将再现复振幅间的相互差异进行校正。针对波面倾斜,可以利用“数字透镜方法”对再现复振幅的相位倾斜进行校正^[13];针对位置偏移,可以利用“图像配准方法”对再现像位置的错位进行补偿^[14]。运用上述两种数字方法,可以在没有任何物体移动先验知识的条件下,实现再现复振幅差异的校正。进而,获得多帧具有相同物光场分布,但散斑噪声不相关的再现像复振幅。进一步通过平均叠加有效抑制物体振幅像和相位像的散斑噪声。需要指出的是,在物体发生较小位移情况下,运用上述方法能够实现精确校正和补偿。

3 实 验

实验光路结构如图1所示。光源为输出光波长

532 nm、功率为50 mW的Nd:YAG倍频激光器,其输出光束经偏振分光棱镜(PBS)分成两束,分别经扩束滤波装置(BE₁和BE₂)成为照明光和参考光(R),两个半波片($\lambda/2$)与偏振分光棱镜配合使用,实现照明光和参考光光强比的连续调节,同时确保两光束偏振态一致。照明光透过消偏振分光棱镜垂直照射物体,其反射光携带物体形貌信息并作为物光(O)。参考光与物光经消偏振棱镜(BS)以一个小夹角(θ)合束,生成离轴全息图并由CMOS相机记录,其像素阵列为1024 pixel×1024 pixel,像素尺寸为6.7 μm ×6.7 μm 。实验中观察物体为USAF-1951分辨率鉴别板,与相机的距离即记录距离为30 cm,将其固定在一个二维平移台上,实现物体在物面内微小平移。需要强调的是,在全息记录过程

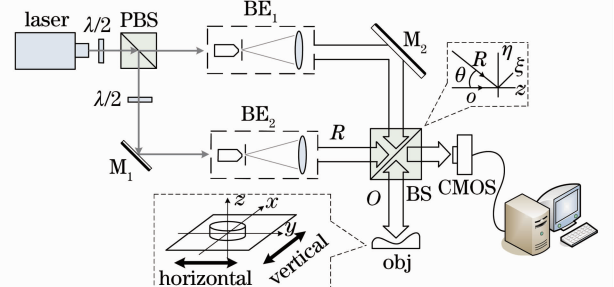


图1 实验光路示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

中物体平移量不需要精确测量,也不依赖于平移机构的精度。

图 2 和图 3 分别给出了不同平移量下的再现振幅像和相位像。其中,图 2(a)和图 3(a)为物体处于初始位置的振幅像和相位像,图 2 和图 3 的 (b)、(c)、(d)和(e)为相对沿上、下、左和右方向微位移后的振幅像和相位像。利用数字图像配准算法^[13],计算得到图 2(b)、(c)、(d)、(e)或图 3(b)、(c)、(d)、(e)相对于初始位置的平移量估计值分别为:6.78、

8.50、6.28、6.18 pixel,即 45.45、56.95、42.10、41.39 μm 。同时,图 2 和图 3 还给出了由白色矩形框标示区域的放大图像,该区域选择在物体表面较平滑、均匀区域,且均为物体的同一区域。比较这些图像可以看出:无论是再现振幅像还是相位像,当物体发生微小平移后,成像面上的散斑噪声分布随机变化,并且互不相关。实验结果表明,通过微位移物体记录全息图,其再现振幅和相位像均具有不同的散斑噪声分布。

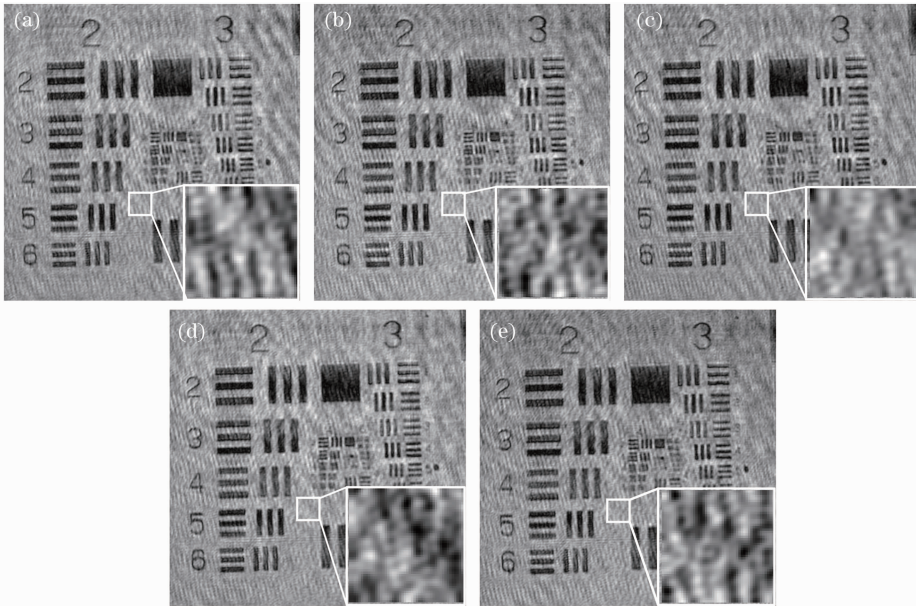


图 2 物体不同微位移下的再现振幅像

Fig. 2 Reconstructed amplitude images with different slightly shiftings

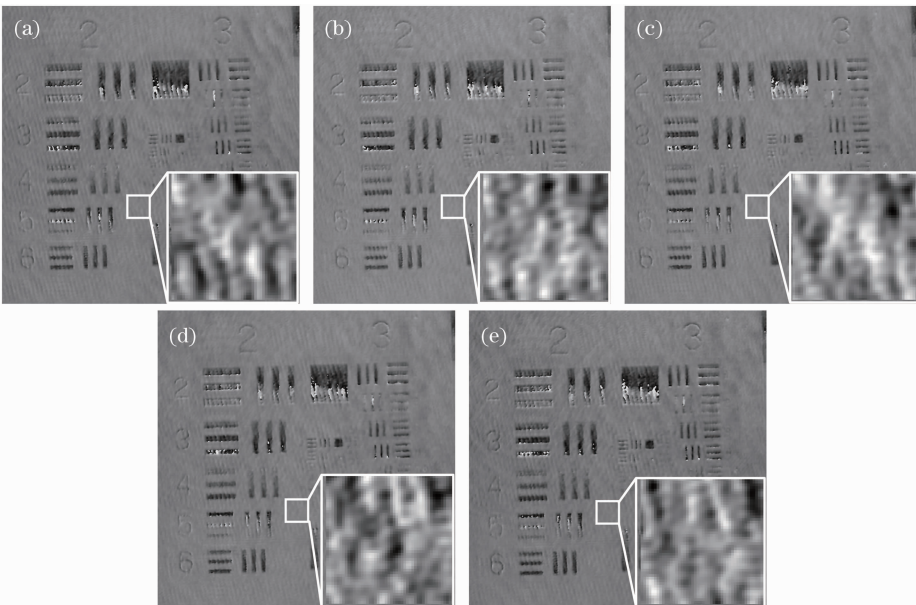


图 3 物体不同微位移下的再现相位像

Fig. 3 Reconstructed phase images with different slightly shiftings

进一步,经波面倾斜和位置偏移校正后,将多帧再现振幅像和相位像进行平均叠加。需要指出的是,为了避免相位值在 π 和 $-\pi$ 处的跃变对平均结果的影响,相位像的平均处理采用相位 \sin 值和 \cos 值分别平均的方法。图 4 和图 5 分别给出了由 40 frame 再现像平均处理后的振幅像、相位像和单幅全息图的再现振幅像、相位像的比较结果。同时,白色方框子图给出了再现振幅像和相位像中心区域

的放大图像。比较这些图像可以看出,通过平均叠加再现振幅像和相位像的散斑噪声明显降低,图像质量显著提高。同时,对平均处理前后的较平滑、均匀的区域(在图 2 和图 3 中由白色矩形标示)的振幅与相位数值求标准差。其中,振幅(灰度值)标准差分别为 30 和 10,相位标准差分别为 10° 和 3° 。实验结果证明,本文提出的方法能够有效抑制散斑噪声对再现振幅像和相位像的影响。

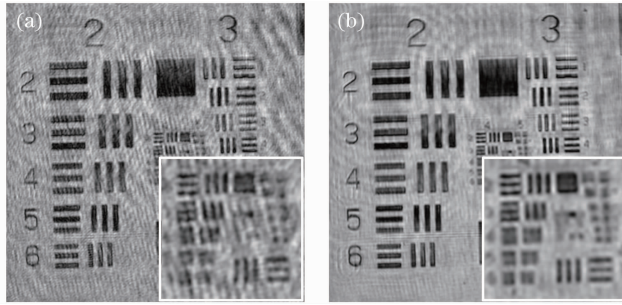


图 4 平均叠加后的振幅像(a)与单幅全息图的再现振幅像(b)

Fig. 4 Reconstructed amplitude images (a) from a single hologram (b) after averaging

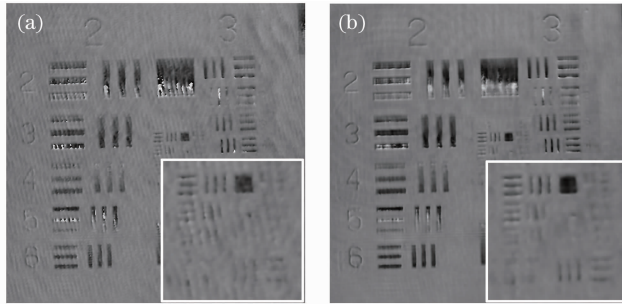


图 5 平均叠加后的相位像(a)与单幅全息图的再现相位像(b)

Fig. 5 Reconstructed phase images (a) from a single hologram (b) after averaging

4 结 论

提出了一种基于微位移的数字全息散斑噪声抑制方法。首先通过物体连续微小平移,获取多帧数字全息图。在数字再现中,各全息图分别进行数字重构,同时利用像差校正算法和图像配准算法,校正由于物体微位移造成的复振幅分布差异。然后通过平均叠加再现振幅像和相位像,实现有效消除散斑噪声。实验结果表明,该方法不仅能够有效抑制振幅像散斑噪声,同时也适用于相位像的散斑噪声抑制。

参 考 文 献

- 1 U. Schnars, W. Jüptner. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(2): 179~181
- 2 Pan Weiqing, Zhu Yongjian, Lang Haita. Phase-contrast imaging technology with digital holographic microscope based system

- calibration[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1812~1820
- 潘卫清, 朱勇建, 郎海涛. 基于系统标定的相衬显微数字全息方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1812~1820
- 3 Zhao Jie, Wang Dayong, Li Yan *et al.*. Experimental study on the quantitative phase-contrast imaging of the biological samples by digital holographic microscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2906~2911
- 赵 洁, 王大勇, 李 艳 等. 数字全息显微术应用于生物样品相衬成像的实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2906~2911
- 4 Wang Yunxin, Wang Dayong, Zhao Jie *et al.*. 3D profile measurement for micro-optical component by using digital holographic microscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0412003
- 王云新, 王大勇, 赵 洁 等. 基于数字全息显微成像的微光学元件三维面形检测[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0412003
- 5 J. Garcia-Sucerquia, J. A. H. Ramirez, D. V. Prieto. Reduction of speckle noise in digital holography by using digital image processing[J]. *Optik*, 2005, **116**(1): 44~48
- 6 Xiaou Cai. Reduction of speckle noise in the reconstructed image of digital holography[J]. *Optik*, 2010, **121**(4): 394~399
- 7 Jonathan Maycock, Bryan M. Hennelly, John B. McDonald. Reduction of speckle in digital holography by discrete Fourier filtering[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(6): 1617~1622

- 8 Akshay Sharma, Gyanendra Sheoran, Z. A. Jaffery *et al.*. Improvement of signal-to-noise ratio in digital holography using wavelet transform[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, **46**(1): 42~47
- 9 Takanori Nomura, Mitsukiyo Okamura, Eiji Nitani *et al.*. Image quality improvement of digital holography by superposition of reconstructed images obtained by multiple wavelengths[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(19): D38~D43
- 10 Chenggen Quan, Xin Kang, Cho Jui Tay. Speckle noise reduction in digital holography by multiple holograms[J]. *Opt. Engng.*, 2007, **46**(11): 115801
- 11 Lu Rong, Wen Xiao, Feng Pan *et al.*. Speckle noise reduction in digital holography by use of multiple polarization holograms[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(7): 653~655
- 12 Pan Feng, Xiao Wen, Rong Lu. Long-working-distance synthetic aperture Fresnel off-axis digital holography[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(7): 5473~5480
- 13 Tomasz Kozacki, Romuald Jo'z'wicki. Digital reconstruction of a hologram recorded using partially coherent illumination[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **252**(1-3): 188~201
- 14 Tristan Colomb, Etienne Cuche, Florian Charrière *et al.*. Automatic procedure for aberration compensation in digital holographic microscopy and applications to specimen shape compensation[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(5): 851~863

栏目编辑:韩 峰