

一种无透镜傅里叶变换数字全息的散斑降噪方法

梁明大^{**}, 陈丽^{*}, 林伟涛, 陈永昊

广东工业大学物理与光电工程学院, 广东 广州 510006

摘要 散斑噪声的存在严重降低了数字全息技术再现像的信噪比和空间分辨率。在无透镜傅里叶变换数字全息中,通过对电荷耦合器件(CCD)记录的干涉图进行一次傅里叶变换,就可以重建物光场。根据干涉图上不同的像素点对再现像中散斑噪声强度分布贡献不同的特点,提出了一种新的降噪方法。该方法将 CCD 输出的干涉图划分为多个区域,并调换各个区域的位置,得到多幅互异的新干涉图,然后将所有新干涉图进行再现处理;对再现像进行叠加平均,就可以得到一幅散斑噪声强度更低的再现像,其等效视数明显提高。相比于空域掩模法,所提方法的处理时间缩短了 80%左右,且再现像的边缘保持系数提高了 1 倍。

关键词 全息; 数字全息; 傅里叶变换; 散斑噪声; 像素

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP55.110901

A Speckle Noise Reduction Method for Lensless Fourier Transform Digital Holography

Liang Mingda^{**}, Chen Li^{*}, Lin Weitao, Chen Yonghao

*School of Physics & Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology,
Guangzhou, Guangdong 510006, China*

Abstract The presence of the speckle noise greatly reduces the signal-to-noise ratio and spatial resolution of the digital holographic reconstructed image. In the lensless Fourier transform digital holography, the object light field can be reconstructed by only one step of Fourier transform on the interferogram recorded by the charge coupled device (CCD). A new speckle reduction method is proposed based on the principle that each pixel in the hologram contributes differently to the distribution of the speckle noise intensity in the reconstructed image in this paper. With this method, we divide the interferogram outputted by the CCD into several regions and exchange the positions of the regions. Many different new reconstruction interferograms are obtained, and then all new interferograms are reconstructed. Then, the reconstructed image with lower speckle noise intensity can be obtained by superimposing and averaging all of the reconstructed images, and the equivalent number of looks improves significantly. Compared with the spatial domain mask method, the proposed method reduces the processing time by 80%, and increases the edge preservation index of the reconstructed image by one times.

Key words holography; digital holography; Fourier transform; speckle noise; pixel

OCIS codes 090.1995; 070.4340; 100.2000; 200.4740

1 引言

数字全息术可以快速记录物体的强度和相位信息,便于实现多种定量测量,再现时可通过数字图像处理技术,优化再现像的质量^[1]。随着电荷耦合器件(CCD)等光电探测器件的快速发展,数字全息的研究也愈受关注^[2]。基于其独特的优势,数字全息

已经被广泛运用到多个领域,如:全息显微^[3-4]、信息加密^[5-6]、粒子测量^[7-8]、3D显示^[9]等。

当相干光束照射在物体的粗糙表面时,在不同表面点散射的光波会发生波动,这些散射波的叠加会在记录平面上形成一个固定的斑点图案^[10],从而严重降低再现像的信噪比和空间分辨率。

目前,研究人员已提出了多种降低数字全息再

收稿日期: 2018-04-27; 修回日期: 2018-05-27; 录用日期: 2018-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(61675050)、广东省科技计划项目(2015B010114007)

* E-mail: ggchenli@gdut.edu.cn; ** E-mail: liangmingda088@163.com

再现像散斑噪声的技术。例如:在数字信号处理方面, Uzan 等^[11-12]提出非局部均值(NLM)滤波法,通过多幅图像的加权平均强度来抑制散斑噪声,但该方法计算相似度的度量缺乏稳健性,且运算十分复杂;在低相干的方法上, Kemper 等^[13-14]提出用部分相干光源代替激光光源可以达到降低激光散斑的效果,但这要依赖于高亮度部分相干光源的采用;在复用全息图处理方面, Huang 等^[15-16]提出了合成孔径数字全息法,通过合成多个记录的全息图来增加全息图的尺寸,从而降低散斑的尺寸,但该方法也需要记录多幅全息图,不适合用于实时处理。

此外, Mori 等^[17-18]提出了一种通过空间域掩模(SDM)法抑制再现像的散斑强度来减小空间分辨率损失的方法。原始干涉图通过带有移动孔径的二值掩模进行过滤,得到多幅子干涉图。由于不同的

子再现像是从干涉图的不同区域重建获得的,因此携带有不一样的散斑模型。将所有子再现像叠加平均后可以有效降低散斑噪声,但该方法没有选择性地对所有的子再现像进行叠加,从而造成了图像信息的过度冗余,而且运行速度慢。

本文提出了一种基于无透镜傅里叶变换数字全息特性的方法,先将原始干涉图划分为多个区域,通过改变各区域的位置来获得多幅新干涉图,并对其进行再现叠加和平均,就可以得到散斑噪声更低的全息图。

2 基本原理

如图 1 所示,用平行光照射物体,该物体的中心位于 z 轴上,点源参考光波的坐标为 $(-b, 0)$ ($b \ll z_0$)。物体和参考光源至 CCD 的距离相等,均为 z_0 。

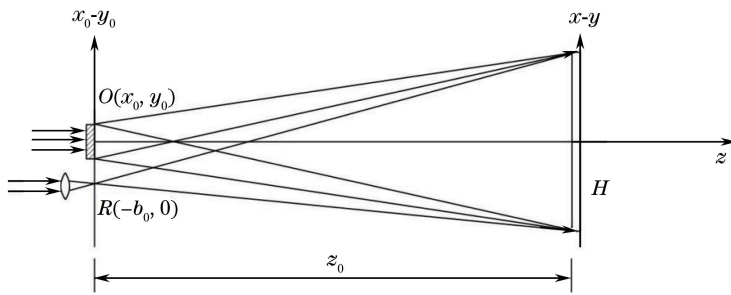


图 1 无透镜傅里叶变换数字全息图记录光路图

Fig. 1 Lensless Fourier transform digital hologram record optical path diagram

根据菲涅耳衍射公式可知,干板处的光振幅由物光波和参考光波两部分组成^[19],它们分别表示为

$$O(x, y) = \exp\left[j \frac{k}{2z_0} (x^2 + y^2)\right] \cdot \mathcal{F}\left\{g(x_0, y_0) \left\{ \exp\left[j \frac{k}{2z_0} (x_0^2 + y_0^2)\right] \right\}\right\} = \exp\left[j \frac{k}{2z_0} (x^2 + y^2)\right] G(f_x, f_y) \Big|_{f_x = \frac{x}{\lambda z_0}, f_y = \frac{y}{\lambda z_0}}, \quad (1)$$

$$R(x, y) = \exp\left[j \frac{k}{2z_0} (x^2 + y^2)\right] \cdot \exp(j2\pi f_x b) \Big|_{f_x = \frac{x}{\lambda z_0}}, \quad (2)$$

式中: $\mathcal{F}\{\}$ 为快速傅里叶变换; k 为波数; $G(f_x, f_y)$ 为 $g(x_0, y_0)$ 的傅里叶变换, f_x, f_y 为 x, y 平面的空间频率; λ 为物光波长; j 为虚数单位。物光和参考光干涉的光强为

$$I(x, y) = |O|^2 + |R|^2 + OR^* + O^*R = |O|^2 + |R|^2 + G(f_x, f_y) \exp(-j2\pi f_x b) + G^*(f_x, f_y) \exp(j2\pi f_x b). \quad (3)$$

用发散球面波 $C(x, y) = \exp\left[-j\left(\frac{k}{2z_0}\right)(x^2 + y^2)\right]$ 再现时, 可得在全息图后 z_0 处的再现光场的复振幅分布:

$$I(x_H, y_H) = \exp\left[j \frac{k}{2z_0} (x_H^2 + y_H^2)\right] \cdot \mathcal{F}[|O|^2 + |R|^2 + G(f_x, f_y) \cdot \exp(-j2\pi f_x b) + G^*(f_x, f_y) \exp(j2\pi f_x b)]. \quad (4)$$

从(4)式可以看出,无透镜傅里叶变换数字全息术可以通过直接对全息图进行傅里叶变换实现数字再现,从而使数字全息的再现得以简化。在再现光场中,除了零级光场外,还会得到清晰的原始像和共轭像。

3 数字全息降噪方法

3.1 空域掩模降噪法

如图 2 所示,SDM 法是在 CCD 输出的干涉图上通过移动矩形窗口得到多幅子干涉图的。在该方

法中,方框内的像素强度不变,而方框外的像素强度为零,子干涉图的大小不变。所有子干涉图再现之后,各自携带不同的散斑模型^[18]。经掩模法优化的再现像可以表示为

$$U(X,Y) = \frac{1}{N_S} \sum_{n=1}^{N_S} |\mathcal{F}[I_H(x,y)H_n(x,y)]|^2, \quad (5)$$

式中: $I_H(x,y)$ 为 CCD 记录的干涉图; $H_n(x,y)$ 为

掩模窗口; N_S 为子干涉图的总数量。干涉图 $I_H(x,y)$ 中的像素总量为 $N_x \times N_y$,而子干涉图的大小不变,但有效的像素总量等于窗口的大小,即 $D_x \times D_y$ 。故子干涉图数量的最大值为

$$N_S = \left(\frac{N_x - D_x}{d_x} + 1 \right) \times \left(\frac{N_y - D_y}{d_y} + 1 \right), \quad (6)$$

式中: d_x, d_y 分别为掩模窗口按行和列移动的步长。

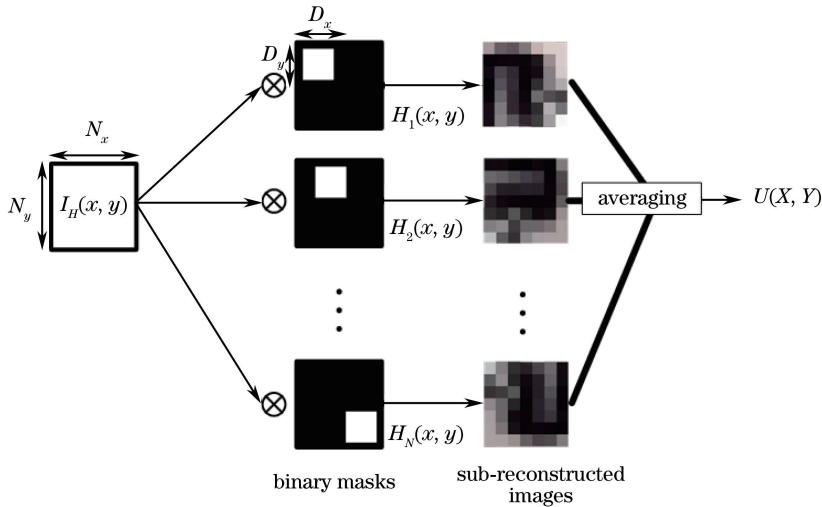


图2 SDM法的原理

Fig. 2 Schematic of SDM method

3.2 干涉图重组降噪法

设 $I_H(x,y)$ 为 CCD 输出的干涉图,将其划分为 $N \times N$ 个等大小的区域,如图3所示。

$I_{11} \sim I_{NN}$ 可表示为

$$I_{ij} = I_H(x,y) \times \text{rect}(D_x, D_y) \times \delta(x + iD_x) \times \delta(y + jD_y), i, j \in [1, N], \quad (7)$$

式中: $\text{rect}(D_x, D_y)$ 为 D_x 和 D_y 所组成的区域; D_x 和 D_y 分别为划分区域的长度和宽度; i, j 为标号。原始干涉图可表示为

$$I_H(x,y) = I_{11}(x,y) + I_{12}(x,y) + \dots + I_{NN}(x,y). \quad (8)$$

由傅里叶变换定理可知,函数在空域中的平移会带来频域中的相移,即

$$F[g(x-a, y-b)] = G(f_x, f_y) \cdot \exp[-j2\pi(f_x a + f_y b)]. \quad (9)$$

所以,当 $I_{11} \sim I_{NN}$ 所在位置以随机组合的方式被无规则打乱时,重整的干涉图 $I'_H(x,y)$ 就可以表示为

$$I'_H(x,y) = I_{11}(x-a_{11}, y-b_{11}) + I_{12}(x-a_{12}, y-b_{12}) + \dots + I_{NN}(x-a_{NN}, y-b_{NN}), \quad (10)$$

式中: $a_{11} \sim a_{NN}, b_{11} \sim b_{NN}$ 分别为各个区域在空域上的平移值。将重整后的全息图 $I'_H(x,y)$ 进行再现处理,即

$$U(X,Y) = |\mathcal{F}[I'_H(x,y)]|^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |\mathcal{F}[I_{ij}(x,y)]|^2 \cdot \exp[-j2\pi(f_x a_{ij} + f_y b_{i,j})], \quad (11)$$

式中: $U(X,Y)$ 为最终再现像的光强。由上文可知,无透镜傅里叶再现的方法是直接对 CCD 输出的干涉图进行傅里叶变换,得到再现像的复振幅。由(11)式可知,当干涉图被打乱时,经过傅里叶变换和再现像的共轭相乘之后,会引入参数 a_{ij} 和 b_{ij} ,即所得到的再现像像素的强度都会改变。因此,再现像的噪声强度分布也会发生改变。划分的区域越多,像素强度改变的动态范围就会越广。

将干涉图划分为 $N \times N$ 个区域时,重新排列的方式有 $A_{N^2}^{N^2}$ 种。将多幅再现像进行累加和平均,可得到最终的再现像,即:

$$U(X,Y) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N^2} U_i(X,Y), \quad (12)$$

式中: N^2 为累加的幅数。

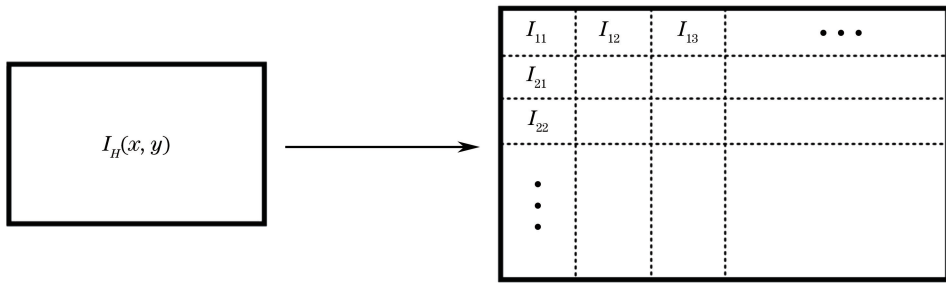


图 3 数字全息图划分示意图

Fig. 3 Schematic of digital hologram division

4 实验分析

图 4 中所用的激光器为 He-Ne 激光器, 波长为 632.8 nm, 分光镜 BL 的分光比为 1:1, CCD 像素尺寸为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$, 分辨率为 $960 \text{ pixel} \times 1280 \text{ pixel}$. 该实验中的实物为五角硬币和骰子。

采用 MATLAB 软件对 CCD 记录的干涉图进行再现处理, 得到的再现像如图 5 所示。

再现像的降噪效果可以通过等效视数 (ENL) 来评估。等效视数是评价同质区域降噪质量的一个很好的指标, 其值随噪声降低而增加。其表达式为

$$\alpha_{\text{ENL}} = \left(\frac{\langle I \rangle}{\sigma} \right)^2, \quad (13)$$

式中: $\langle I \rangle$ 、 σ 分别为再现像的均值和标准差。等效视数的值越高, 表示图像的去噪效果越好。

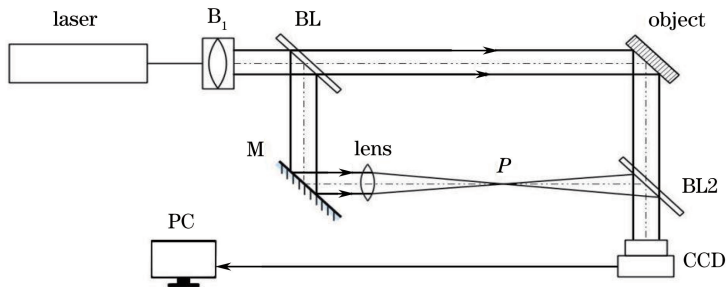


图 4 无透镜傅里叶变换数字全息光路图

Fig. 4 Lensless Fourier transform digital holography optical path diagram

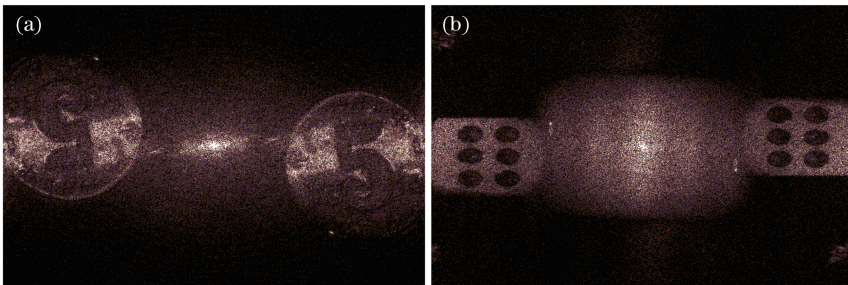


图 5 无透镜傅里叶变换数字全息再现像。(a) 硬币; (b) 骰子

Fig. 5 Lensless Fourier transform digital holographic reconstructed images. (a) Coins; (b) dices

在本实验中, 对于 SDM 方法, 掩模窗口 $H_n(x, y)$ 的大小分别取 $320 \text{ pixel} \times 427 \text{ pixel}$ 、 $240 \text{ pixel} \times 320 \text{ pixel}$ 、 $192 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 步长 d_x 、 d_y 均取 20 pixel 。相应地, 在所提方法中, 干涉图分别被划分为 3×3 、 4×4 、 5×5 个区域, 三种区域的大小分别对应于 $320 \text{ pixel} \times 427 \text{ pixel}$ 、 $240 \text{ pixel} \times 320 \text{ pixel}$ 、

$192 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。

经两种方法处理后, 再现像的等效视数随着幅数的增加而改变, 如图 6 所示。在图中, 蓝线表示 $192 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 绿线表示 $240 \text{ pixel} \times 320 \text{ pixel}$, 红线表示 $320 \text{ pixel} \times 427 \text{ pixel}$, 实线表示所提方法, 虚线表示 SDM 方法。

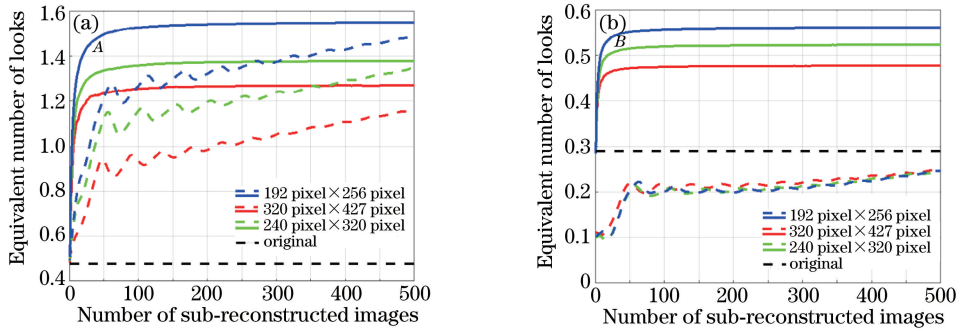


图6 等效视数与子再现像幅数的关系。(a)骰子;(b)硬币

Fig. 6 Equivalent number of looks changes with the increase of the number of sub-reconstructed images. (a) Dice; (b) coin

在图6中,黑色虚线表示未经优化的再现像的等效视数。从图6中可以看出,红绿蓝三条实线均高于黑色曲线,且随等效视数增大而快速趋于水平。这表明,经所提方法处理后,再现像的质量明显提高,且质量随着子再现像幅数增加而逐渐稳定。在红绿蓝三线中,蓝线最高,红线最低。这表明,对于同一幅干涉图,划分的区域越多,最终的再现像的质量越高。

相比于SDM方法,所提方法能更快地提高再现像的等效视数,而且在子再现像幅数约为80时开始趋于稳定。此外,在SDM方法中,再现像等效视数的速度提高得较慢,耗时长,当子再现像幅数持续增长到一定值时,其等效视数也会比所提方法的等效视数高。但在这种情况下,SDM方法处理的再现

像因将过多图像叠加而导致信息过度冗余,从而出现曝光现象。

在图7中,SDM法选取的掩模窗口 $H_n(x,y)$ 的大小为192 pixel×256 pixel,其步长 d_x, d_y 均为20 pixel,幅数为 N_s (其由(6)式给出)。相应地,在所提方法中,干涉图被划分为 5×5 个区域,幅数为80。对于SDM方法或所提方法,三种不同的掩模窗口(或区域划分)得到的再现像相近,因此只取一种情况进行对比。

图7(a)、(b)所示图像的散斑明显降低了,硬币和骰子的边缘也更加清晰,再现像的整体质量显著提高;图7(c)、(d)所示图像中有很明显的曝光现象,而且图像的边缘模糊。

两种方法处理再现像所需时间如表1所示。

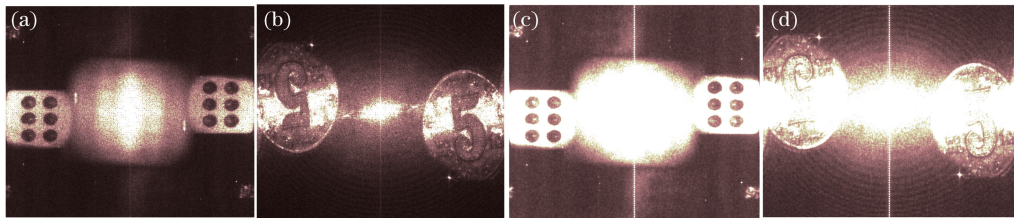


图7 所提方法与SDM方法得到的再现像。(a)所提方法,骰子;(b)所提方法,硬币;(c)SDM方法,骰子;(d)SDM方法,硬币

Fig. 7 Reconstructed images using proposed method and SDM method.

(a) Proposed method, dices; (b) proposed method, coins; (c) SDM method, dices; (d) SDM method, coins

表1 两种方法的处理时间

Table 1 Processing time of two methods

s

Aperture	Proposed method		SDM method	
	Dice	Coin	Dice	Coin
320 pixel×427 pixel	6.52	7.17	103.75	109.58
240 pixel×320 pixel	5.75	5.77	135.14	136.50
192 pixel×256 pixel	5.46	5.46	130.72	134.94

由表1可知,相比于SDM方法,所提方法的耗时不足其1/10。可见,采用所提方法能更快得到优化的再现像。

边缘保持系数(EPI)能表示图像经优化算法处理之后,垂直或水平方向上图像边缘的保持能力^[20],其表达式为

$$V_{\text{EPI}} = \frac{\sum_{i=1}^M |I(x, y) - I(x, y + 1)|_{\text{after}} + |I(x, y) - I(x + 1, y)|_{\text{after}}}{\sum_{i=1}^M |I(x, y) - I(x, y + 1)|_{\text{before}} + |I(x, y) - I(x + 1, y)|_{\text{before}}}, \quad (14)$$

式中: $I(x, y)$ 为图像像素的强度; M 为图像的总像素。边缘保持系数越高, 表示算法的边缘保持能力

越强。对于经两种方法优化的再现像, 其边缘保持系数如表 2 所示。

表 2 两种方法优化的再现像的边缘保持系数

Table 2 Edge preservation index of reconstructed image improved by two methods

Aperture	Proposed method		SDM method	
	Dice	Coin	Dice	Coin
320 pixel×427 pixel	0.3348	0.2869	0.1612	0.1771
240 pixel×320 pixel	0.2810	0.3080	0.1038	0.1195
192 pixel×256 pixel	0.2211	0.2435	0.0912	0.0741

由表 2 可知, 所提方法得到的图像的边缘保持系数为 SDM 方法的 2 倍, 表明所提方法的边缘保持能力更好。

5 结 论

数字全息再现像中含有不可避免的噪声, 这会严重影响再现像的质量。无透镜傅里叶变换数字全息只需进行一次傅里叶变换, 就可以重建物光信息。本课题组基于无透镜傅里叶变换数字全息的特点, 提出了一种新的降噪方法。该方法通过划分原始干涉图, 随机摆布各个区域的位置, 获得了多幅不同的干涉图, 对这些重组的干涉图再现并进行累加平均, 就可以得到噪声更低的再现像, 其边缘保持系数明显提高。相比于 SDM 降噪方法, 所提方法在 MATLAB 平台上处理的时间缩短了 80%, 再现像的边缘保持系数是 SDM 方法的 2 倍。此外, 所提方法只需一幅干涉图, 适用于实时处理。

参 考 文 献

- [1] Jiang Z L, Veetil S P, Cheng J, *et al.* High-resolution digital holography with the aid of coherent diffraction imaging[J]. *Optics Express*, 2015, 23(16): 20916-20925.
- [2] Darakis E, Khanam T, Rajendran A, *et al.* Microparticle characterization using digital holography[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(2): 1037-1044.
- [3] Zeng Y N, Lu J S, Liu Y, *et al.* Three-dimensional displacement tracking technique of particle based on digital holographic microscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1204001. 曾雅楠, 卢钧胜, 刘源, 等. 基于数字全息显微的微粒三维位移跟踪测量技术[J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1204001.
- [4] Nguyen T, Bui V, Lam V, *et al.* Automatic phase aberration compensation for digital holographic microscopy based on deep learning background detection[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 15043-15057.
- [5] Abuturab M R. Multiple information encryption by user-image-based gyrator transform hologram [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 92: 76-84.
- [6] Wu W M, Chen J Z. Multiple watermarking method based on double random phase encryption system with double quick response code [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 120901. 吴为民, 陈家祯. 基于双快速反应码双随机相位加密系统的多重水印方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 120901.
- [7] Kim S, Lee S J. Measurement of Dean flow in a curved micro-tube using micro digital holographic particle tracking velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 2008, 46(2): 255-264.
- [8] Chang X Y, Zeng Y N, Lei H, *et al.* Three-dimensional position measurement method with nanoscale precision for overlapped particles in liquid [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0812002. 常新宇, 曾雅楠, 雷海, 等. 液态中交叠微球的三维纳米级位置测量方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0812002.
- [9] Wan W Q, Qiao W, Huang W B, *et al.* Multiview holographic 3D dynamic display by combining a nano-grating patterned phase plate and LCD [J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 1114-1122.
- [10] Liu N, Yang C, Cao H J. Noise suppression of the reconstruction of infrared digital holography based on

- pyramid-based bilateral filter[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 85: 352-358.
- [11] Uzan A, Rivenson Y, Stern A. Speckle denoising in digital holography by nonlocal means filtering [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(1): 195-200.
- [12] Cui S S, Li Q. A comparison of filtering techniques on denoising terahertz coaxial digital holography image [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10157: 101571R.
- [13] Kemper B, Stürwald S, Remmersmann C, *et al.* Characterisation of light emitting diodes (LEDs) for application in digital holographic microscopy for inspection of micro and nanostructured surfaces [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(7): 499-507.
- [14] Mori Y, Nomura T. Speckle reduction in hologram generation based on spherical waves synthesis using low-coherence digital holography [J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(10): 867-872.
- [15] Huang H C, Rong L, Wang D Y, *et al.* Synthetic aperture in terahertz in-line digital holography for resolution enhancement [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(3): A43.
- [16] Zhong L Y, Zhang Y M, Lü X X. Synthetic aperture digital holography and multiple reference wave synthetic aperture digital holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(11): 1343-1347.
- 钟丽云, 张以谟, 吕晓旭. 合成孔径数字全息的分析模拟及多参考光合成孔径数字全息 [J]. *光子学报*, 2004, 33(11): 1343-1347.
- [17] Mori Y, Fukuoka T, Nomura T. Extended focused imaging in digital holography by spatial-domain mask method [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17 (12): 125706.
- [18] Fukuoka T, Mori Y, Nomura T. Speckle reduction by spatial-domain mask in digital holography [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(4): 315-322.
- [19] Chen J B, Su X Y. Principles and applications of optical information technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009: 143-144.
- 陈家璧, 苏显渝. 光学信息技术原理及应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 143-144.
- [20] Zhang W, Sun R H, Zhang X C. Noise removal of SAR image based on improved wavelet soft-thresholding method [J]. *Remote Sensing Information*, 2004, 19(4): 4-6.
- 张微, 孙蓉桦, 章孝灿. 基于改进的小波软阈值法的 SAR 图像去噪 [J]. *遥感信息*, 2004, 19(4): 4-6.