

同轴数字全息自动聚焦与再现像的融合

王凤鹏 谢晓春 谢应茂 郭金水 尹真

(赣南师范学院物理与电子信息学院, 江西 赣州 341000)

摘要 由于数字全息采用相干光成像,当再现距离偏离焦点时,再现像的边缘会出现振荡现象,采用传统的清晰度评价函数不能准确实现自动聚焦。通过对再现像进行小波分析可以发现,偏离焦点时的小波变换高频系数的幅值比聚焦时要小得多。针对这一特点,对拉普拉斯算子和小波变换清晰度评价函数进行了改进,将原来利用高频系数之和改为利用聚焦窗口中高频系数的最大幅值为清晰度评价依据。为便于同时观察到数字全息三维空间内的目标,还提出了将不同层面上的再现像进行融合的算法。进行了模拟数字全息自动聚焦及再现像融合实验和用数字全息观察生物标本的实验。实验结果表明,改进后的清晰度评价函数可以准确实现数字全息的自动聚焦;提出的融合算法可以将数字全息再现后得到的一系列再现像融合到一幅图片中。

关键词 数字全息;自动聚焦;融合;再现像;小波变换;拉普拉斯算子

中图分类号 O438; TB877 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.040901

Auto-Focusing for Digital In-Line Holography and Fusion of Reconstructed Image

Wang Fengpeng Xie Xiaochun Xie Yingmao Guo Jinshui Yin Zhen

(School of Physics and Electronic Information, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract When the reconstructed image is out of focus, oscillation will appear at the edge of objects, because digital holography is a coherent imaging system. Therefore, it is inaccurate to perform auto-focusing by the traditional evaluation function of definition in digital holography. It can be found through wavelet analysis that the amplitude of high-frequency coefficients out of focus is smaller than that in focus. The evaluation function of definition based on Laplacian operator and wavelet transform is improved. The maximum amplitude of high-frequency coefficients in the focal windows, instead of the sum of high-frequency coefficients, is used to evaluate the definition of the reconstructed image. In order to get a clear image that contains all relevant objects in the three-dimensional (3D) space of digital holography, a fusion algorithm is proposed. The auto-focusing and reconstructed image fusion experiments for simulated digital in-line holography and an ant detection experiment are completed. Experimental results show that the improved evaluation function of definition can accurately achieve auto-focusing for digital holography, and a series of reconstructed image can be fused into a clear image by the proposed fusion algorithm.

Key words digital holography; auto-focusing; fusion; reconstructed image; wavelet transform; Laplacian operator

OCIS codes 090.1995; 090.1970; 100.3175; 100.2000

1 引言

数字全息技术是 Goodman 等^[1]在 1967 年提出的,其基本原理是用光敏电子元件替代普通全息干版来记录全息图,用计算机通过数字计算方式得到再现像。近年来,随着计算机技术的发展和高分辨率 CCD 元件的出现,数字全息技术得到了很大的发展,在空间微粒检测、生物样本和活体细胞的研究与观测等方面都已得到广泛的应用^[2~4]。

相对于普通的显微成像系统而言,同轴数字全息成像的主要优点在于:1) 光路简单,将准直后的平行激光束经被测物场(如粒子场)投射到 CCD 感光元件上,则经物体散射或衍射的光将与直接透射的光将在

收稿日期: 2011-10-31; 收到修改稿日期: 2011-11-11; 网络出版日期: 2012-02-15

基金项目: 江西省教育厅青年科学基金项目(GJJ11220)和国家科技支撑计划重点项目(2009BAI78B01)资助课题。

作者简介: 王凤鹏(1981—),男,硕士,讲师,主要从事光学检测和光电图像信号处理等方面的研究。

E-mail: wangfengpeng@163.com

CCD 感光面上形成干涉条纹,即可得到数字全息图;2) 视场大,一次曝光检测面积与 CCD 元件的感光面积相同;3) 可实现三维检测,由于在记录数字全息图时不需要光学聚焦过程,而是在数字再现时先得到一系列不同层面上的再现像,再利用聚焦判据函数实现数字聚焦选出清晰的再现像,因此被检测的物体与 CCD 之间的记录距离可以在很大的范围内变化。同轴数字全息的独特优点使其得到了广泛的应用,如 Vossing 等^[5]应用同轴全息术研究水汽现象,测量雨滴、雪花、冰针粒子大小、形状和速度,Xu 等^[6]利用同轴数字全息显微术开展了对直径为 5~10 μm 的藻类生物在四维空间的跟踪研究,Sun 等^[7,8]利用水下数字全息研究了海洋浮游生物。

实现自动聚焦是数字全息应用中的关键之一。目前实现自动聚焦的方法有强度起伏最小法、熵最小法、小波系数和能量稀疏相关的锐度法及基于导数的自动对焦算法(Sobel 算子)等^[9~13]。这些方法有的只适合于不透明粒子的检测,有的抗噪声能力较差,有的算法复杂,处理时间长。在传统的光学成像系统中,常用于自动聚焦的清晰度判别方法已较为成熟,如拉普拉斯算子和小波变换等^[14,15]。但由于数字全息是相干光成像系统,当再现距离偏离焦点时,再现像的边缘会出现振荡现象,传统的清晰度评价函数不能准确实现自动聚焦。因此,有必要对数字全息的自动聚焦方法进行更深入的研究。

在利用同轴数字全息进行三维检测时,一次曝光可得到一系列不同层面上的再现像,为便于同时观察到整个视场中各个层面上的目标,需要将不同层面上的再现像融合到一幅图上。本文研究了实现数字全息再现像的自动聚焦的方法,并在此基础上提出将不同层面上的数字全息再现像融合到一幅图的算法。

2 同轴数字全息

同轴数字全息记录过程如图 1 所示,设物面与全息记录面(CCD)的距离为 z_0 ,平行光照射到被测物面后,受被测物的调制形成的物面光场分布为 $o(x,y)$,则经衍射后在全息记录面上的光场分布为

$$o_{z_0}(x,y) = p(x,y,z_0) * o(x,y), \quad (1)$$

式中 $p(x,y,z_0) = \frac{1}{j\lambda} \frac{\exp[j(2\pi/\lambda) \sqrt{z_0^2 + x^2 + y^2}]}{\sqrt{z_0^2 + x^2 + y^2}}$ 表示衍射传播点扩展函数,* 表示卷积运算, λ 为光波波长。则在记录面上形成的全息图,即由 CCD 记录的光强分布图为

$$I_H(x,y) = |1 - o_{z_0}(x,y)|^2. \quad (2)$$

数字全息再现相当于模拟全息图在单位振幅平面波照射下的衍射过程,再现的光场分布为

$$o_R(x,y) = I_H(x,y) * p(x,y,z_R), \quad (3)$$

则再现像的光强分布为 $I_o(x,y) = |o_R(x,y)|^2$,在再现时,只有当 $z_R = z_0$ 时才能得到最清晰的再现像。由于在计算机数值再现过程中可以方便地改变 z_R 的值,直到得到最清晰的像,即可以通过程序实现自动数字聚焦,因此在全息记录时不需要精确调节 z_0 的值。

3 数字全息再现的自动聚焦方法

实现数字全息自动聚焦的基本原理是,让再现距离 z_R 在估计的记录距离附近以某一步长变化,得到一系列的再现像,再利用清晰度评价函数选出最清晰的再现像。

3.1 基于边缘检测的清晰度评价函数

对图像进行边缘检测的算子有很多,用于评价图像清晰度时,拉普拉斯算子性能最佳^[16]。8 邻域拉普拉斯算子可用模板的形式表示为

$$\nabla^2 \approx \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

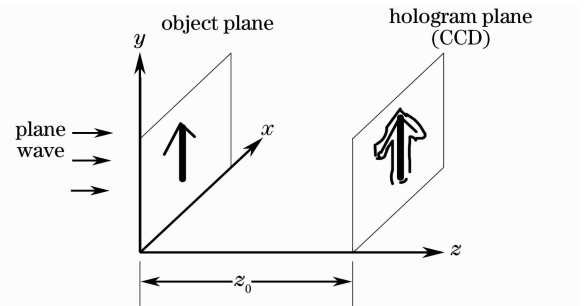


图 1 同轴数字全息记录

Fig. 1 Digital in-line holography

则图像在 (x, y) 处的边缘系数为

$$l(x, y) = \nabla^2 I_o(x, y) \approx |8I_o(x, y) - I_o(x-1, y-1) - I_o(x-1, y) - I_o(x-1, y+1) - I_o(x, y-1) - I_o(x, y+1) - I_o(x+1, y-1) - I_o(x+1, y) - I_o(x+1, y+1)|. \quad (6)$$

一般来说,衡量一幅图像是否清晰,可根据图像的边缘细节来判断,细节越丰富,则说明图像越清晰。因此聚焦判断函数可表示为

$$L_{\text{sum}} = \sum_{(x, y) \in S} l(x, y), \quad (7)$$

式中 S 表示聚焦窗口,通过找出 L_{sum} 的最大值即可确定聚焦的位置。

3.2 基于小波变换的清晰度评价函数

通过对图像进行小波变换,可将图像信号分解为低频分量、垂直方向高频分量、水平方向高频分量和对角高频分量。一般情况下,图像越清晰,则高频系数越大越丰富,因此基于小波的清晰度评价函数可表示为^[10]

$$W_{\text{sum}} = \sum_{n=1}^i \left[\sum_{(x, y) \in \text{LHn}} |W_{\text{LHn}}(x, y)| + \sum_{(x, y) \in \text{HLn}} |W_{\text{HLn}}(x, y)| + \sum_{(x, y) \in \text{HHn}} |W_{\text{HHn}}(x, y)| \right], \quad (8)$$

式中 i 为小波分解层数, $W_{\text{LHn}}(x, y)$ 、 $W_{\text{HLn}}(x, y)$ 、 $W_{\text{HHn}}(x, y)$ 为第 n 层各高频分量小波系数,相应的分解窗分别为LHn、HLn、HHn。

3.3 数字全息再现像清晰度评价函数

对于普通的光学成像系统,偏离焦点越远,图像越模糊,则图像的边缘细节越少,高频分量也越小。如图2所示为一幅 $160 \text{ pixel} \times 170 \text{ pixel}$ 的同轴数字全息再现像对比图,其中图2(a)为聚焦再现像,图2(b)为再现距离偏离记录距离 2 mm 时的离焦再现像,图2(c)为图2(a)、(b)中第100行的灰度曲线,图2(d)为图2(c)对应的小波变换系数。从图2可以看出,由于数字全息利用的是相干光成像,当再现像偏离焦点时,不仅物体的边缘变得模糊不清,同时物体的周围将存在一些衍射条纹。在小波变换后,小波高频系数的总和没有明显变化,图2(d)中聚焦小波系数之和为 1.61 ,离焦小波系数之和为 1.57 ,但物体边缘处的高频系数幅值较聚焦时要小得多。因此(7)式和(8)式将不再适合于全息成像系统的自动聚焦。可将(7)、(8)式改为

$$L_{\text{max}} = \max_{(x, y) \in S} l(x, y), \quad (9)$$

$$W_{\text{max}} = \max_{(x, y) \in S} [|W_{\text{LHn}}(x, y)| + |W_{\text{HLn}}(x, y)| + |W_{\text{HHn}}(x, y)|], \quad (10)$$

即通过找出聚焦窗口内拉普拉斯边缘系数或小波变换高频系数的最大值作为评价数字全息再现像清晰度的标准。

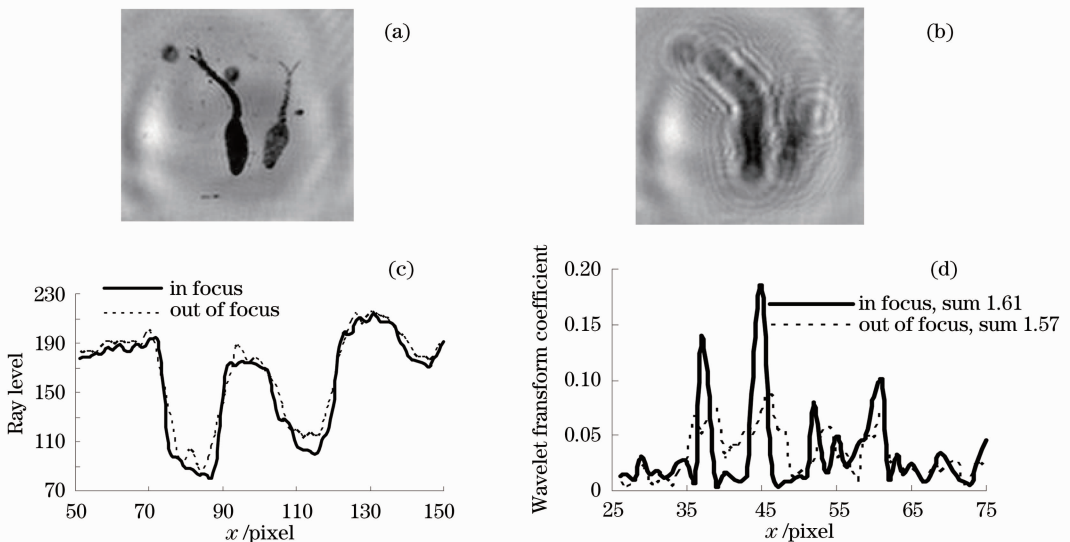


图2 数字全息再现像。(a)聚焦;(b)离焦;(c)灰度分布曲线;(d)小波变换系数

Fig. 2 Reconstructed image of digital hologram. (a) in focus; (b) out of focus; (c) intensity profiles; (d) wavelet transform coefficients

4 数字全息自动聚焦实验及结果分析

4.1 模拟数字全息实验结果

本文采用 Matlab 编程模拟了血吸虫尾蚴检测实验,其中数字全息记录距离为 $z_0 = 20$ mm,具体算法及其他参数见文献[17]。再现时使 z_R 从 10 mm 变化到 30 mm,每 1 mm 得到一幅再现像,将整幅再现像画面作为聚焦窗口,分别用(7)~(10)式求出其清晰度,并对每一种方法得到的清晰度值进行归一化,得到聚焦评价函数曲线如图 3 所示。从图中可以看出,改进前的清晰度评价函数值随再现距离没有明显的变化,且峰值出现的位置与正确聚焦的位置有偏差,不能实现数字全息自动聚焦。改进后的评价函数具有很好的单峰性和无偏性,只有当 $z_R = z_0 = 20$ mm 时,再现像的清晰度最大,得到的再现像如图 2(a)所示。由此可见,改进后的清晰度函数可以用于数字全息的自动聚焦。(10)式中分别取 $n=1,2,3$ 得到的聚焦评价曲线如图 4 所示,从图中可以看出,当取 $n=1$ 时聚焦精度最高,当 $n=3$ 时聚焦的峰值出现了偏差,因此只需进行一次小波变换即可实现数字全息自动聚焦。

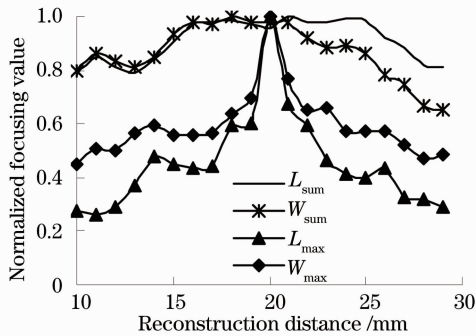


图 3 不同聚焦评价函数曲线

Fig. 3 Curves of focusing evaluation function with different methods

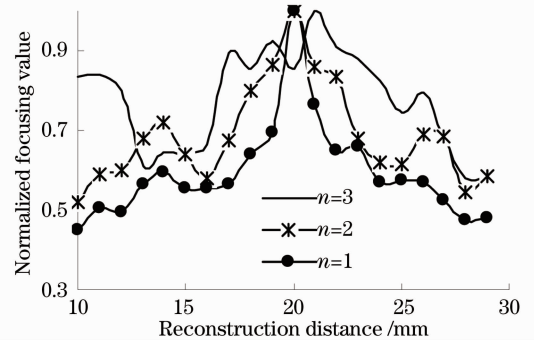


图 4 不同层小波聚焦评价函数曲线

Fig. 4 Curves of focusing evaluation function with different depths

图 5 为改进后的基于最大小波高频系数的自动聚焦法与文献中提到的强度起伏最小法和熵最小法自动聚焦的对比图。从图 5(a)中可以看出,强度起伏最小法的单峰性很差,且其最小值与理论值之间出现了偏差,不能准确实现自动聚焦。这是因为强度最小起伏法需要先从再现像中分割出聚焦区域,这在不透明粒子的检测中比较容易实现,而针对比较复杂的检测目标(如本文模拟的血吸虫尾蚴)时,由于目标与背景的对比度不大,分割的聚焦区域与目标区域不能很好地重叠。而且由于被测目标比较复杂,即使在准确聚焦时,目标区域内的强度也是有起伏的。由此可见强度起伏最小法不适合于灰度本身有变化的复杂目标的检测。图 5(b)中的熵最小法单峰性较好,峰值出现的位置准确,但聚焦时的熵与离焦时的熵变化不明显,抗噪声能力较差。而本文改进后的基于最大小波高频系数的自动聚焦法适用于不是完全透明的较复杂目标的检测,聚焦与离焦时的数值变化比较大,具有较强的抗噪声能力。

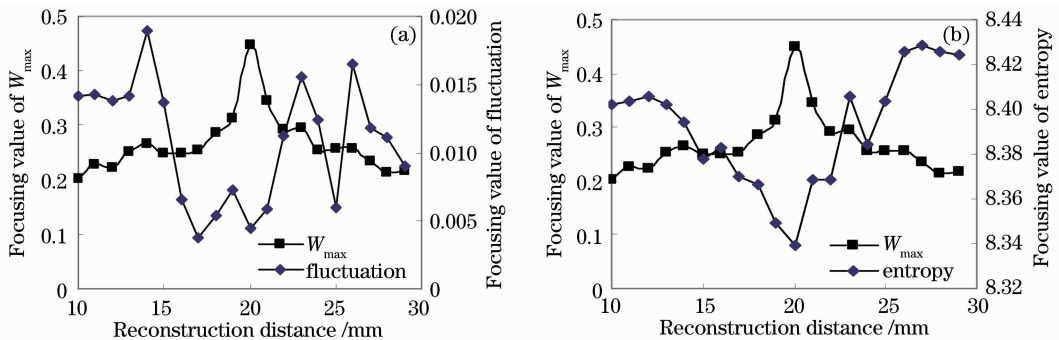


图 5 最大小波系数法与不同聚焦算法的对比:(a)起伏最小法,(b)熵最小法

Fig. 5 Comparison of maximum wavelet coefficient method with other focus algorithm;

(a) minimum fluctuation, (b) minimum entropy

4.2 用数字全息观察生物标本实验结果

图 6(a)为利用同轴数字全息术观察蚂蚁标本得到的全息图,实验中采用的激光波长为 $\lambda=650\text{ nm}$,拍摄记录全息图的 CCD 图像传感器的像素宽度为 $5.9\ \mu\text{m}$,像素数为 $480\text{ pixel}\times 640\text{ pixel}$ 。利用本文改进后的评价函数得到再现像的清晰度函数曲线如图 6(b)所示。从图中可以看出,拉普拉斯函数失去了自动聚焦函数要求的单峰性,而基于小波变换的清晰度评价函数仍然具有很好的单峰性。当 $z_R=56\text{ mm}$ 时 W_{\max} 达到最大值,此时得到的蚂蚁标本数字全息再现像如图 6(c)所示,从中可清晰地看到蚂蚁的主要特征,说明其自动聚焦是准确的。

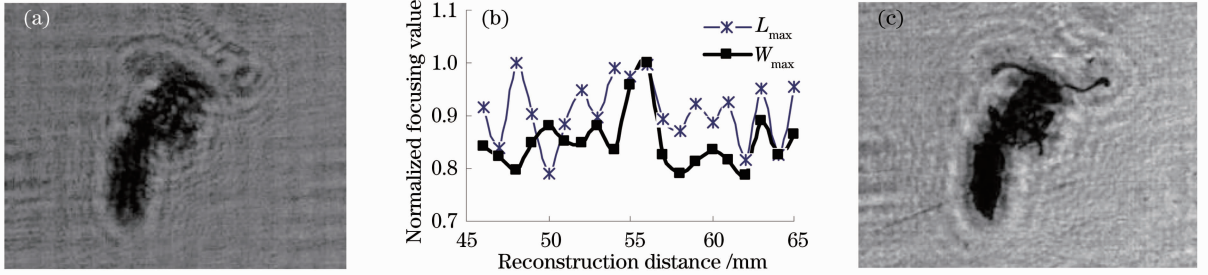


图 6 蚂蚁观测实验。(a) 数字全息图; (b) 聚焦评价函数曲线; (c) 聚焦再现像

Fig. 6 Experiment of ant detection. (a) digital hologram; (b) curves of focusing evaluation function; (c) reconstructed image in focus

图 3 和图 6(b)的结果表明:在噪声较小的情况下(模拟全息图),改进的拉普拉斯评价函数性能略优于小波变换评价函数;在处理实际拍摄的数字全息图时,由于含有较大的散斑噪声,拉普拉斯评价函数难以实现自动聚焦,而改进后的小波变换清晰度评价函数具有更强的抗噪声能力,仍然可以准确地实现数字全息自动聚焦。

5 数字全息再现像的融合及实验结果

数字全息的最大特点就是拍摄一张全息图可以一次性记录下不同 z_0 处所有观测目标的信息,而在再现时得到的每一幅再现像中只能看到部分清晰的目标。图 7 模拟了物体分别处在 $z_0=0.05, 0.052, 0.054\text{ m}$ 三个层面时形成的数字全息图。当选取整幅再现像画面为聚焦窗口时,根据(10)式得到其再现像的清晰度曲线如图 8 所示。

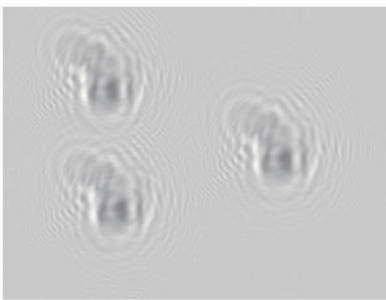


图 7 三层物体数字全息图

Fig. 7 Digital hologram of three objects at different z_0

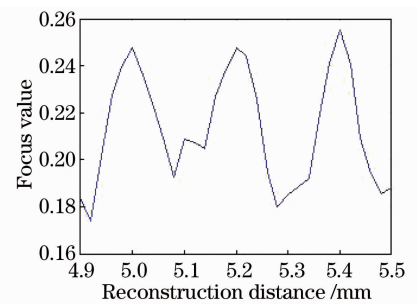


图 8 三层物体聚焦评价函数曲线

Fig. 8 Curves of focusing evaluation function of three objects at different z_R

再现距离 $z_R=0.05, 0.052, 0.054\text{ m}$ 时得到的再现像分别如图 9(a)~(c)所示,在每一幅再现图像中,只有处于聚焦位置(记录距离与当前再现距离相等)的物体才是清晰的,而其他物体的像则是模糊的。因此,要对视场中所有的物体进行观测,则需要分别观测 3 幅再现像。而当视场中的物体大小不相同且密度较高时,则要观测更多的图片或不能观测到视场中的所有物体。为便于观察,我们希望在同一幅图中看到的视场中所有物体都是清晰的,因此有必要将所有的再现像融合到一幅图片中。

本文提出的基于小波变换的数字全息再现像的融合算法如下:

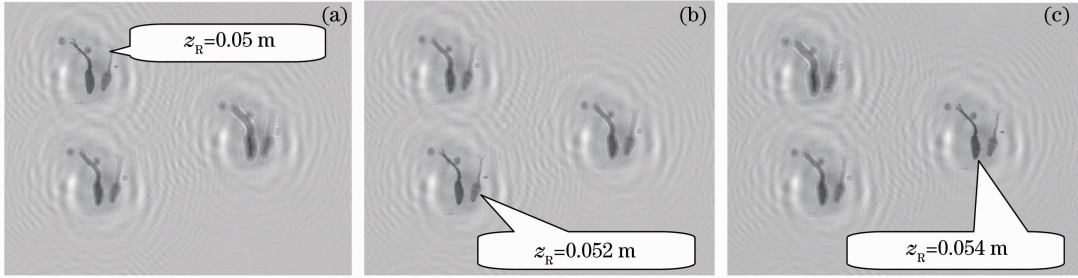


图9 数字全息再现像。(a)聚焦位置 0.05 m; (b) 聚焦位置 0.052 m; (c) 聚焦位置 0.054 m

Fig. 9 Reconstructed images of digital hologram. (a) focusing at $z_R=0.05$ m; (b) focusing at $z_R=0.052$ m; (c) focusing at $z_R=0.054$ m

1) 计算不同再现距离处的再现像,并对每一幅再现像进行一次小波变换;

2) 将再现像分成 $m \times n$ 个聚焦窗口,如图 10 所示, m, n 的大小可根据视场中待测物体的浓度取合适的值(视场中待测物体的浓度越高,则区域数量应越多);

3) 计算每一幅再现像在聚焦窗口 S_{11} 内的清晰度,确定清晰度最大的再现像,从中取出被 S_{11} 覆盖的部分作为融合图像的 S_{11} 覆盖部分;

4) 依次移动聚焦窗口,重复步骤 3) 依次得到融合图像中其他聚焦窗口覆盖部分,直到得到完整的数字全息再现像融合图。

利用本文提出的数字全息再现像的融合算法,聚焦窗口数取为 10×10 ,图 7 模拟的数字全息再现像的融合结果如图 11 所示,图中所有物体的像都是清晰的。

S_{11}	S_{12}	...	S_{1n}
S_{21}	S_{22}	...	S_{2n}
...
S_{m1}	S_{m2}	...	S_{mn}

图 10 聚焦窗口

Fig. 10 Focusing windows

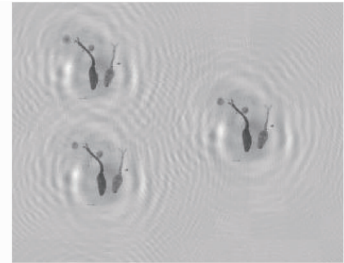


图 11 数字全息再现像的融合结果

Fig. 11 Fusion result of reconstructed image of digital hologram

5 结 论

理论分析和实验结果表明,传统的用于实现自动聚焦的拉普拉斯清晰度评价函数和小波变换评价函数不适合用于数字全息的自动聚焦。本文对拉普拉斯清晰度评价函数和小波变换清晰度评价函数进行改进,可以准确实现数字全息的自动聚焦;特别是改进后的小波变换清晰度评价函数具有较强的抗噪声能力,在处理含有较大散斑噪声的实拍数字全息图时,仍可准确实现自动聚焦。提出了数字全息再现像的融合算法,可以将数字全息再现后得到的一系列再现像融合到一幅图片中,在融合后的图片中可以清晰地看到视场三维空间中的所有物体,使再现像的观察更加方便。

参 考 文 献

- 1 J. W. Goodman, R. W. Lawrence. Digital image formulation from electronically detected holograms[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **11**(3): 77~79
- 2 Lü Qieni, Gao Yan, Ge Baozhen *et al.*. Digital holographic particle sizing with hough transform[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 940~944
- 吕且妮, 高 岩, 葛宝臻 等. 基于霍夫变换的数字全息粒子尺寸测量[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 940~944
- 3 Francisco Palacios, Jorge Ricardo, Danial Palacios *et al.*. 3D image reconstruction of transparent microscopic objects using

- digital holography[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **248**(1-3): 41~50
- 4 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
- 5 H. J. Vossing, S. Borrmann, R. Jaenicke. In-line holography of cloud volumes applied to the measurement of raindrops and snowflakes[J]. *Atmos. Res.*, 1998, **49**(3): 199~212
- 6 W. Xu, M. H. Jericho, H. J. Kreuzer. Tracking particle in four dimensions with in-line holographic microscopy[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(3): 164~166
- 7 H. Sun, P. W. Benzie, N. Burns *et al.*. Underwater digital holography for studies of marine plankton[J]. *Phil. Trans. Royal Soc. A*, 2008, **366**(1871): 1789~1806
- 8 Peter R. Hobson, John Watson. The principles and practice of holographic recording of plankton[J]. *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.*, 2002, **4**(4): S34~S49
- 9 G. Pan, H. Meng. Digital holography of particle fields: reconstruction by use of complex amplitude[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(5): 827~833
- 10 Xu Yuanqiang, Wang Yurong, Ding Haisheng. Segmentation identification and independent focus for digital in-line holography of particle fields[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 881~887
徐元强, 王玉荣, 丁海生. 数字同轴全息颗粒场检测中的颗粒分割识别与独立聚焦[J]. *光子学报*, 2010, **39**(3): 881~887
- 11 M. Antkowiak. Extended focused imaging of a microparticle field with digital holographic microscopy[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(14): 1626~1628
- 12 M. Liebling, M. Unser. Autofocus for digital Fresnel holograms by use of a Fresnel-sparsity criterion[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**(12): 2424~2430
- 13 Liu Changgeng, Wang Dayong, Zhang Yizhou *et al.*. Derivatives-based autofocus algorithms for the digital holographic imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2989~2996
刘长庚, 王大勇, 张亦卓等. 数字全息成像中基于导数的自动对焦算法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2989~2996
- 14 Zhu Zhengtao, Li Shaofa, Chen Huaping. Research on auto-focused function based on the image entropy[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2004, **12**(5): 537~542
朱铮涛, 黎绍发, 陈华平. 基于图像熵的自动聚焦函数研究[J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(5): 537~542
- 15 Wang Yiwen, Liu Xianli, Xie Hui. A wavelet-based focus measure and 3-D autofocusing for microscope images[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2006, **14**(6): 1063~1069
王义文, 刘献礼, 谢晖. 基于小波变换的显微图像清晰度评价函数及 3-D 自动调焦技术[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(6): 1063~1069
- 16 Liu Xingbao, Yuan Daocheng. Research on image definition criterion using wavelet transform based on the texture analysis [J]. *Chin. J. Scientif. Instrum.*, 2007, **28**(8): 1508~1513
刘兴宝, 袁道成. 基于纹理分析的小波变换图像清晰度评价方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2007, **28**(8): 1508~1513
- 17 Fengpeng Wang, Xiangzhi Zhen, Xianghua Zhen *et al.*. Simulation analysis of digital in-line holography for schistosoma cercariae detection[C]. 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics, 2011, **4**: 447~450