

基于内插与外推的数字全息分辨率增强方法

夏好广 张佳辰 纪晓丽 闫 锋 曹 汛

(南京大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210093)

摘要 为了提高数字全息再现图像的分辨率,分析了增强图像分辨率的典型方法,提出了同时采用图像内插与外推的数字全息分辨率改进方法。对采集的全息图运用图像算法进行向内插值与向外填充,在全息面和物面之间采用角谱方法进行双向衍射迭代。通过该方法可以实现全息图的内插与外推,内插过程可以增加全息图空间采样率而外推过程扩大了全息图数值孔径。同时,讨论了内插与外推的限制因素,并将新的改进方法与单独采用外推或内插进行了比较,模拟和实验结果证明,运用该方法可以明显改善再现图像分辨质量。

关键词 全息; 分辨率增强; 迭代; 图像再现

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201441.0409003

A Resolution Enhancement Method Based on Interpolation and Extrapolation in Digital Holography

Xia Haoguang Zhang Jiachen Ji Xiaoli Yan Feng Cao Xun

(School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract In order to improve the resolution of reconstruction image in digital holography, the traditional resolution enhancement methods are studied. Here, a resolution improvement method based on extrapolation add with interpolation is proposed. The recorded hologram is interpolated and extra-padded using image algorithm. An iterative process is applied by diffracting the wave-field between hologram plane and object plane. The interpolated and extrapolated hologram can be retrieved by this method. The interpolation process can increase the special sample frequency while the extrapolation can enlarge the numerical aperture. Simultaneously, limiting factors of interpolation and extrapolation are also discussed. We have compared the new method with interpolation or extrapolation, respectively. The simulation and experimental results show that the resolution of reconstructed image is improved significantly by using this proposed method.

Key words holography; resolution enhancement; iteration; image reconstruction

OCIS codes 090.1995; 100.2000; 110.3010

1 引 言

随着计算机和图像传感器技术的进步,数字全息术^[1]发展迅速,它采用电荷耦合器件(CCD)或互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器代替传统的全息干板来记录全息图,具有数字化、快速处理等优势,已在许多领域(如显微成像、动态分析和微结构测试等)得到广泛运用^[2-5]。数字全息的最大缺点是分辨率较低,图像传感器的孔径尺寸和像素尺寸是影响分辨率的主要原因^[6-7]。根据衍射理论可

以知道数值孔径限制数字全息图极限分辨率,数值孔径是由全息图的尺寸和记录距离决定的。图像传感器的芯片尺寸直接影响着全息图尺寸,进而限制系统的分辨率。CCD或CMOS图像传感器的典型空间采样率(200 lp/mm)远小于传统全息干板的空间采样率(3000 lp/mm),为了充分利用传感器面积并满足采样,必须增加记录距离,所以像素尺寸也间接影响全息分辨率。另外像素尺寸也影响角谱再现图像的空间采样率^[8-10],而空间采样影响再现图像

收稿日期: 2013-10-23; 收到修改稿日期: 2013-12-02

基金项目: 南京大学研究生院科研基金(2012CL18)

作者简介: 夏好广(1987—),男,博士研究生,主要从事光电信息方面的研究。E-mail: xiahaoguang@163.com

导师简介: 曹 汛(1983—),男,博士,副教授,主要从事光电信息及图像处理等方面的研究。

E-mail: caoxun@nju.edu.cn(通信联系人)

效果,采样率越高,图像的细节越明显,所以全息图尺寸和像素尺寸都直接或间接的影响再现图像的分辨质量^[10],如何增加全息图尺寸及提高采样率是改善全息再现质量的关键。

传统提高数字全息分辨率的方法之一是合成孔径技术^[11-15],该技术基本原理是通过移动图像传感器或者物体的位置采集多幅全息图,然后再进行合并以获得更大的数值孔径,也可以通过在光路中引入衍射光栅或采用结构光照等方法来实现。但合成孔径技术只改变了孔径即全息图的有效大小,全息图空间采样间隔并没有改变;另外一种提高数字全息分辨率的技术是亚像素技术^[16-17],该技术要求在一个像素尺寸范围内移动传感器芯片的位置采集多幅全息图,根据位置参数将欠采样的图像进行图像合并,进而获得具有更高采样频率的全息图。虽然两种技术都可以改进数字全息的分辨率,但在获取多幅全息图像时对系统稳定性要求较高,增加了系统的复杂性和图像处理的难度。最近,Latychevskaia等^[18]提出一种基于纯数值处理的外推法,该方法主要通过在全息面和物面之间的衍射

过程来实现全息图外推进来增强再现图像的横向分辨率,该方法是基于在采样足够且全息图尺寸不足的前提下工作,并没有改变全息图的空间采样频率,使用范围受到限制。

本文采用图像内插与外推的数字全息分辨率改进新方法,在不增加系统复杂度的情况下可以同时增加系统的孔径和提高全息图空间频率。对采集的全息图运用图像算法进行向内插值与向外填充,在全息面和物面之间采用角谱方法进行双向衍射迭代。通过该方法可以实现全息图的内插与外推,拓展了外推法的适用范围,模拟和实验结果证明运用该方法再现图像的质量得到了进一步改善。

2 原理及方法描述

根据全息成像基本原理,记录的全息图强度为 $I_H = |R + O|^2 = R^2 + O^2 + RO^* + R^*O$, (1) 式中 R 和 O 分别为到达全息面的参考光和物光。利用角谱方法,在距离全息平面距离为 z 的像平面上再现光场的分布为

$$U = \text{FFT}^{-1} \left\{ \text{FFT}(R \cdot I_H) \cdot \exp \left[j \frac{2\pi z}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 U 是全息图角谱衍射光场, λ 是对应光照波长, z 为传播距离。角谱方法可以较为精确地计算光的衍射过程,在计算过程中进行两次傅里叶变换,所以利用角谱算法再现图像的空间采样间隔与全息图采样间隔(像素尺寸)相同^[8-9],该尺寸影响再现图像的空间采样率^[10]进而影响图像质量,空间采样率越高,物体边缘越平滑,细节越明显。另外,系统数值孔径限制数字全息图极限分辨率,数值孔径是由全息图的尺寸和记录距离决定的,为了满足采样,记录距离 z 又受像素大小的限制。可见全息图尺寸和像素尺寸都直接或间接地影响角谱再现图像分辨质量。分辨率增强方法的目的是获得具有更高空间频率和更大尺寸的全息图以提高再现图像质量,增强分辨能力,具体流程如图 1 所示。

具体可以分为以下三个步骤: 1) 对已经获得的全息图 I 进行向内插值(如立方插值、线性插值等图像插值方法),以获得具有更小像素尺寸的图像,并定义插值后的图面积为 A 。然后利用固定常数值将内插后的全息图向外填充,以获得具有更大尺寸的图像,外填充后的全息图定义为 I_0 。取全息图 I_0

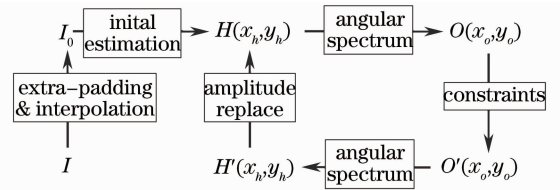


图 1 基于内插与外推的分辨率增强方法流程图
Fig.1 Flow chart of resolution enhancement method based on interpolation and extrapolation

的强度的平方根作为幅值(初始相位为零)作为初始的输入光场 H_0 , 在后面的迭代过程中全息图相位会不断更新,而幅值不变,迭代的目的是恢复 A 以外区域的信息以及整个全息面的复数光场; 2) 采用角谱方法将输入光场 H_0 传播到物平面。在物平面,定义一个包含物体在内的边界区域 S ^[19], S 以内的数值不变, S 以外区域的数值用背景值 D 代替:

$$O'_i(x_o, y_o) = \begin{cases} D(x_o, y_o), & x_o, y_o \in S \\ O_i(x_o, y_o), & x_o, y_o \notin S \end{cases}, \quad (3)$$

式中背景值 $D(x_o, y_o)$ 是将在没有物体情况下记录的背景强度的平方根衍射到物面而获得。另外根据透射物体正吸收特性,对于物平面幅值超过背景数

值 D 的像素设置为 D ; 3) 将修正的物面光场利用角谱方法正向传播到全息面, 此时全息面已经具有非零相位值, 在区域 A 内将其幅值用初始输入场 H_0

的幅值替换作为新的输入场, 转至步骤 2) 进行下一次迭代。经过第 i 次迭代后的全息图更新为

$$H_i(x_h, y_h) = \begin{cases} |H'_i(x_h, y_h)| \exp[j\varphi_i(x_h, y_h)], & x_h, y_h \notin A \\ |H_0(x_h, y_h)| \exp[j\varphi_i(x_h, y_h)], & x_h, y_h \in A \end{cases} \quad (4)$$

该全息图具有更大的尺寸和空间采样频率, 最后对其利用角谱方法再现。

3 模拟结果

利用透射式同轴数字全息光路对不同尺寸的物体进行模拟, 光源为 532 nm 的平面光, 记录距离 30 mm, 模拟的物体为两个不同直径 ($D_1 = 20 \mu\text{m}$, $D_2 = 40 \mu\text{m}$) 和不同边缘距离 ($d_1 = 14 \mu\text{m}$, $d_2 = 20 \mu\text{m}$) 的遮光圆孔, 中间放大部分如图 2(a) 所示, 初始的全息图为 $1000 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$, 像素尺寸为 $2 \mu\text{m}$, 如图 2(b) 所示。为了模拟像素尺寸和孔径的限制因素, 取中间 $320 \text{ pixel} \times 320 \text{ pixel}$ 然后通过像素合并得到像素尺寸为 $16 \mu\text{m}$ 、大小为 $40 \text{ pixel} \times$

40 pixel 的全息图作为初始状态, 如图 2(c) 所示。为了更清楚地了解本方法中内插与外推的作用, 对 4 种情况下的全息图进行再现对比。首先进行直接迭代再现, 将 $40 \text{ pixel} \times 40 \text{ pixel}$ 的全息图直接用迭代过程再现, 迭代 100 次后获得的角谱再现结果如图 2(d) 所示, 看到较大的物体可以被分辨, 而小尺寸物体无法分辨, 另外明显看出再现图像空间采样间隔较大, 无法分辨物体本身细节的信息。其次采用单独外推再现, 用常数为 1 的数值将全息图图像外填充至 $100 \text{ pixel} \times 100 \text{ pixel}$, 再采用迭代过程进行处理, 经过 100 次迭代后角谱再现结果如图 2(e) 所示, 其中小尺寸的物体可以分离, 但仍由于采样间隔没有改变, 物体细节仍然不明显。然后采用单独内插再现与原始对比, 运用立方插值方法将全息图从 $40 \text{ pixel} \times$

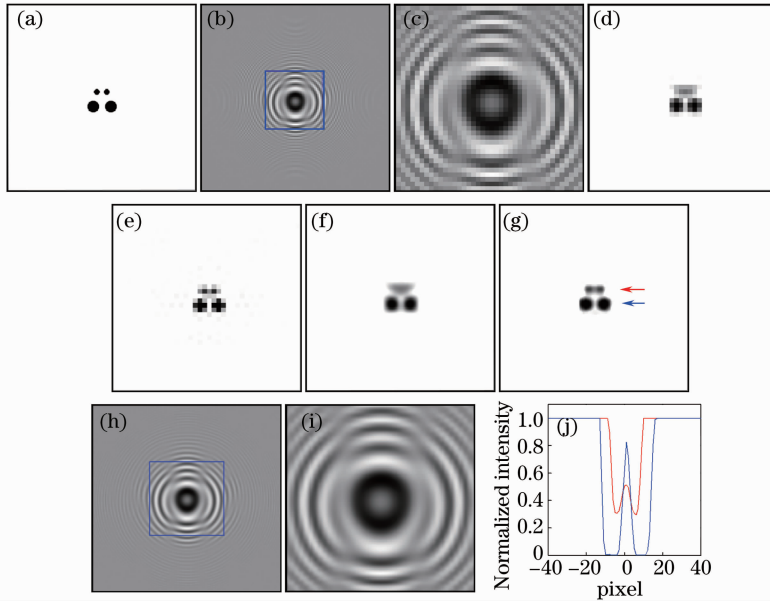


图 2 模拟物体再现。(a) 模拟输入物体图, 只显示了局部 $640 \mu\text{m} \times 640 \mu\text{m}$; (b) 生成的全息图; (c) 图 (b) 中标注 $40 \text{ pixel} \times 40 \text{ pixel}$ 部分全息图; (d) 对应图 (c) 直接进行迭代再现结果; (e) 单独外推方法再现结果; (f) 单独内插迭代再现结果; (g) 基于内插与外推方法迭代再现结果; (h) 基于内插与外推方法迭代 100 次获得的全息图; (i) 对应图 (h) 中标注 $160 \text{ pixel} \times 160 \text{ pixel}$ 区域; (j) 沿 (g) 中箭头方向强度曲线

Fig. 2 Reconstruction of the simulated object. (a) Simulated object, $640 \mu\text{m} \times 640 \mu\text{m}$ part is shown; (b) hologram of the object; (c) $40 \text{ pixel} \times 40 \text{ pixel}$ marked in (b); (d) reconstruction of (c) after 100 iterations; (e) reconstruction based on extrapolation only; (f) reconstruction based on interpolation only; (g) reconstruction based on extrapolation and interpolation; (h) hologram retrieved after 100 iterations based on interpolation and extrapolation; (i) $160 \text{ pixel} \times 160 \text{ pixel}$ marked in (h); (j) intensity curves along the arrows in (g)

40 pixel内插为 160 pixel \times 160 pixel,再运用迭代再现,迭代 100 次后再现结果如图 2(f)所示,可以很明显地看出再现图像的空间采样频率提高后,能分辨出较大物体的外形细节,但较小尺寸的物体却仍然无法分辨。最后采用内插与外推法再现,运用立方插值方法将全息图从 40 pixel \times 40 pixel 内插为 160 pixel \times 160 pixel,再用常数为 1 的数值将图像外填充至 400 pixel \times 400 pixel,并采用相同的迭代过程进行处理,经过 100 次迭代后,原始全息图区域以外的信息得以恢复,如图 2(h)所示,图 2(i)为迭代后全息图中间部分放大区域,恢复的全息图具有更高空间采样频率和更大尺寸。角谱再现图像质量相比之前也得到进一步改善,再现结果如图 2(g)。图 2(j)给出了分别对应图 2(g)中箭头方向的横截面曲线数值。在以上迭代过程中采用 120 $\mu\text{m}\times$ 120 μm 作为物面 S 区域,物体显示区域面积统一为 640 $\mu\text{m}\times$ 640 μm 。

4 实验结果及讨论分析

4.1 实验装置

实验采用透射式同轴数字全息系统,实验装置示意图如图 3 所示。光源为波长 532 nm 激光。扩束准直后的平面波照射物体,采用 CMOS-APS 图像传感器模块进行全息图的采集,图像尺寸选择 100 pixel \times 100 pixel,像元尺寸为 8.8 $\mu\text{m}\times$ 8.8 μm 。测试样品为采用在玻璃基板上淀积铬薄膜后通过激光刻蚀法制作的掩模板,掩模图案为四个相同直径(20 μm)不同间距(5,10,15 μm)的遮光圆盘[图 4(a)]。

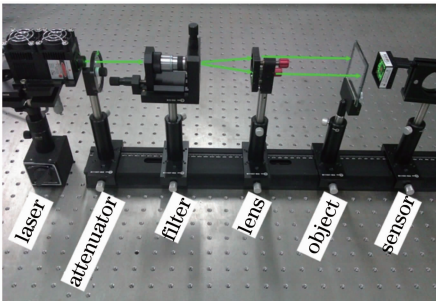


图 3 同轴数字全息成像装置示意图

Fig. 3 Inline digital holography setup

为了得到相对准确的记录距离,采用基于方差的聚焦算法^[20]来测定距离,测得聚焦再现距离为 27.6 mm。为了有效消除光源不均匀性对实验的影响,采用归一化的全息图作为处理对象,归一化全息图获取方法为:在有样品和没有样品情况下分别记录全息光强 H 和背景光强 B ,样品衬底(玻璃基底)

对光的透射吸收为 k (小于 1,可以事先测得),则归一化全息图为 $H/(Bk)$ 。

4.2 实验结果

图 4(a)为物体的显微图,图 4(b)是获得的归一化全息图。对全息图直接进行迭代再现,迭代 100 次后再现结果如图 4(c)所示,图像中较近两个目标分辨率不足而且细节不明显。单独采用外推法将全息图扩展为 200 pixel \times 200 pixel,迭代再现结果如图 4(d),从图中可以分辨出四个中心点,但仍然不能显示物体的细节信息。单独采用内插法将原始全息图内插为 400 pixel \times 400 pixel,迭代再现结果如图 4(e)所示,与直接再现对比,对于间隔较远的目标物体细节更加明显,但相邻较近的目标仍然混叠在一起。采用基于内插与外推的再现方法再现,先利用立方插值将全息图从 100 pixel \times 100 pixel 内插为 400 pixel \times 400 pixel,然后四周补 1 外扩为 800 pixel \times 800 pixel,经过 100 次迭代后,最终的全息图如图 4(g)所示,其角谱再现结果如图 4(f),图 4(h)为对应图 4(c)与图 4(f)中颜色箭头方向的具体数值,与原始直接再现比较再现图像质量得到了明显改善,分辨率也获得了提高。

4.3 讨论分析

通过原理介绍及实验结果可以理解该方法中内插和外推两个过程通过不同的方向影响图像质量,内插过程减小了有效像素尺寸,可以增加角谱再现图像的空间采样频率。外推过程增加全息图尺寸,通过增加孔径可以增加再现图像的分辨率。需要指出该方法中的内插或外推过程并不能无限使用来不断改进图像质量。首先内插过程是基于已经采样完成的全息图进行数字插值,并不等同于采用更小像素尺寸的探测器直接进行采样,只能在部分程度上恢复部分采样信息,而不能恢复所有漏采的高频信息,恢复的程度根据不同的内插算法和原始全息图采样频率而不同。其次外推过程在一定范围内随外推尺寸越大,横向分辨率越高,而在到达一定程度后分辨率将几乎不再增加,即外推的有效尺寸受到限制:1) 根据全息原理,记录距离一定、采样间隔一定的情况下,全息面只有在一定尺寸范围内才满足采样条件,以外区域越远欠采样程度越高,同时对探测器动态范围要求也越高,所以外推法得到的有效尺寸并不能无限扩大;2) 迭代外推过程还依赖于物面的约束条件,约束条件定义的精确性直接影响则外推速度和最终的有效尺寸。

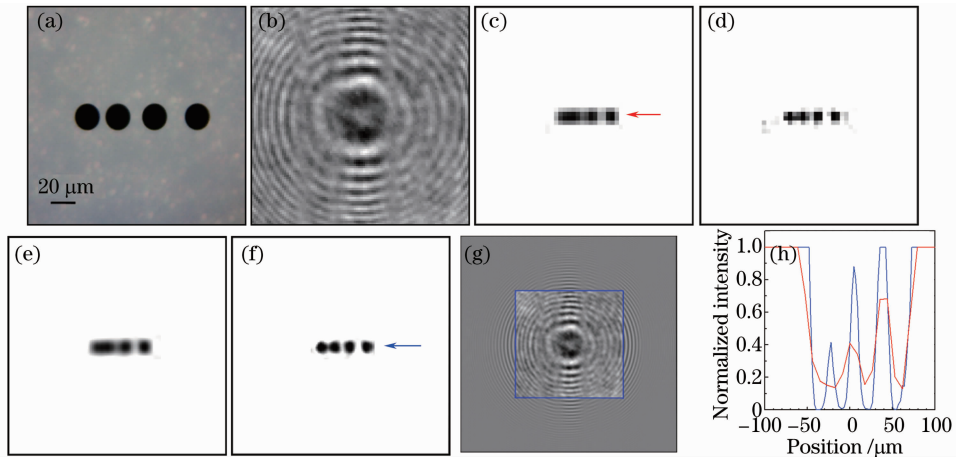


图4 实验物体再现结果。(a)物体显微图;(b)归一化全息图;(c)直接迭代100次再现结果;(d)单独外推方法再现结果;(e)单独内插方法再现结果;(f)基于内插与外推方法迭代再现结果;(g)基于内插与外推方法迭代100次获得的全息图;(h)沿(c)与(f)中箭头方向强度曲线

Fig. 4 Reconstruction of the experimental object. (a) Microscope image of the object; (b) normalized hologram of the object; (c) its reconstruction after 100 iterations; (d) reconstruction based on extrapolation only; (e) reconstruction based on interpolation only; (f) reconstruction based on extrapolation and interpolation; (g) hologram retrieved after 100 iterations based on interpolation and extrapolation; (h) intensity curves along the arrows in (c) and (f)

另外需要指出当全息图尺寸足够时,外推过程的作用受到限制^[18],而内插过程却可以继续作用。下面给出采用同样实验装置对 $8\ \mu\text{m}$ 条形分辨率板的测试结果进行说明,方差法测定记录距离 $10.07\ \text{mm}$,图像采集选用 $200\ \text{pixel}\times 200\ \text{pixel}$ 。从全息图5(a)可以看出该记录条件下图像中间 $50\ \text{pixel}$ 半径以外由于采样不足已经无法有效采集到目标干涉条纹,所以很大一部分区域是无效的,即限制分辨率的因素已经不是初始图像的尺寸,这种情况下使用外推也无法恢复该图以外的信息,而内插值过程则可以继续使用。

图5(b)、(c)给出采用内插值前后的角谱再现结果,由于角谱再现图像采样间隔为 $8.8\ \mu\text{m}$,采样频率不足导致角谱再现后物体图像严重混叠,难以分辨 $8\ \mu\text{m}$ 的目标。可以看到内插之后(立方插值为原来的4倍)再现图像质量得到明显的改善。同时需要指出随着图像传感器采集的全息图采样频率增加,内插过程的作用会减弱,由于内插过程有助于在外推过程中像面约束条件(物体边界)的准确定义,可以继续使用,所以内插与外推相结合实现了外推法的优化并扩展了其适用范围。

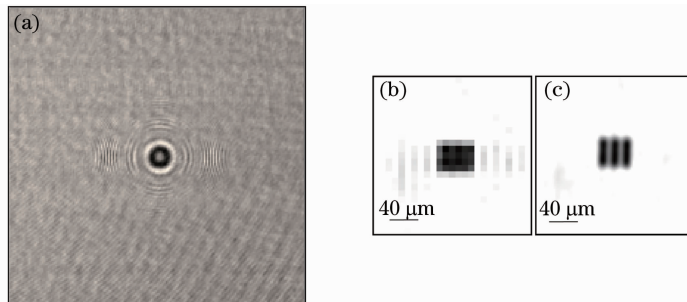


图5 分辨率测试板再现结果。(a)全息图;(b)全息图直接迭代10次再现结果;(c)内插方法迭代10次再现结果
Fig. 5 Reconstruction of the resolution chart. (a) Hologram; (b) reconstruction after 10 iterations; (c) reconstruction after 10 iterations based on interpolation

5 结 论

通过分析全息图尺寸和像素尺寸对数字全息分辨率的影响,以及传统增强分辨率的几种途径,提出了同时采用图像内插与外推的数字全息分辨率改进

新方法。通过该方法可以获得具有更高空间频率和更大尺寸的全息图,在不增加成像系统复杂度的情况下有效提高了角谱方法再现图像的分辨质量,拓展了单独外推方法的适用范围。在上述方法

基础上进行了相关模拟及实验,结果证实了该方法的有效性。

参 考 文 献

- 1 U Schnars, W Juptner. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction[J]. *Appl Opt*, 1994, 33(2): 179—181.
- 2 Ouyang Liting, Wang Dayong, Zhao Jie, *et al.*. Experimental study on the phase-contrast imaging of the living hippocampal neuron cells by digital holographic microscopy[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0909001.
欧阳丽婷, 王大勇, 赵洁, 等. 老鼠大脑海马区神经元活细胞的数字全息相衬成像实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0909001.
- 3 Li Guangyong, Yang Yan. Digital holography particle image velocimetry applied for measurement of the rotating flow fields[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0609001.
李光勇, 杨岩. 数字全息粒子图像测速技术应用于旋转流场测量的研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0609001.
- 4 L Xu, X Peng, J Miao, *et al.*. Studies of digital microscopic holography with applications to microstructure testing[J]. *Appl Opt*, 2001, 40(28): 5046—5051.
- 5 Zeng Yanan, Wang Fei, Lei Hai, *et al.*. Surface profile measurement of microstructures based on dual-wavelength digital microscopic image-plane holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1009001.
曾雅楠, 汪飞, 雷海, 等. 双波长数字显微像面全息术测量微结构表面形貌[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1009001.
- 6 Y Hao, A Asundi. Resolution analysis of a digital holography system[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(2): 183—193.
- 7 A Stern, B Javidi. Analysis of practical sampling and reconstruction from Fresnel fields[J]. *Opt Eng*, 2004, 43(1): 239—250.
- 8 N Akhter, G Min, J W Kim, *et al.*. A comparative study of reconstruction algorithms in digital holography[J]. *Optik*, 2013, 124(17): 2955—2958.
- 9 L Yu, M K Kim. Pixel resolution control in numerical reconstruction of digital holography[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(7): 897—899.
- 10 Fan Qi, Zhao Jianlin, Xiang Qiang, *et al.*. Methods of improving resolution of digital holographic microscopy[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2005, 16(2): 226—230.
范琦, 赵建林, 向强, 等. 改善数字全息显微术分辨率的几种方法[J]. *光电子 • 激光*, 2005, 16(2): 226—230.
- 11 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu. Recording and reconstruction of synthetic aperture digital holography[J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(10): 1207—1211.
钟丽云, 张以谟, 吕晓旭. 合成孔径数字全息的记录、再现及实现[J]. *中国激光*, 2004, 31(10): 1207—1211.
- 12 Jiang Hongzhen, Zhao Jianlin, Di Jianglei, *et al.*. Reconstruction of synthetic aperture digital lensless Fourier transform hologram by use of the screen-division method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3304—3309.
姜宏振, 赵建林, 邸江磊, 等. 合成孔径数字无透镜傅里叶变换全息图的分幅再现[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3304—3309.
- 13 J Di, J Zhao, H Jiang, *et al.*. High resolution digital holographic microscopy with a wide field of view based on a synthetic aperture technique and use of linear CCD scanning[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(30): 5654—5659.
- 14 V Micó, C Ferreira, J Garcia. Surpassing digital holography limits by lensless object scanning holography[J]. *Opt Express*, 2012, 20(9): 9382—9395.
- 15 J Ma, C Yuan, G Situ, *et al.*. Resolution enhancement in digital holographic microscopy with structured illumination[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(9): 090901.
- 16 D Claus, M Fritzsche, D Iliescu, *et al.*. High-resolution digital holography utilized by the sub-pixel sampling method[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(24): 4711—4719.
- 17 W Bishara, T -W Su, A F Coskun, *et al.*. Lensfree on-chip microscopy over a wide field-of-view using pixel super-resolution[J]. *Opt Express*, 2010, 18(11): 11181—11191.
- 18 T Latychevskaia, H -W Fink. Resolution enhancement in digital holography by self-extrapolation of holograms[J]. *Opt Express*, 2013, 21(6): 7726—7733.
- 19 J R Fienup. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform[J]. *Opt Lett*, 1978, 3(1): 27—29.
- 20 Xue Kai, Li Qi, Wang Qi. Wavelet-based autofocus algorithm for terahertz digital holographic imaging[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(s1): s111005.
薛凯, 李琦, 王骐. 基于小波变换的太赫兹数字全息成像自动聚焦算法[J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s111005.

栏目编辑:何卓铭