

离轴数字全息零级像的空域滤波预处理消除法

朱余良,周皓,顾济华

(苏州大学物理科学与技术学院,江苏 苏州 215006)

摘要:基于离轴数字全息记录特点和数字图像处理技术,提出了一种消除离轴数字全息零级像的有效方法。该方法只需记录一幅数字全息图,无需增加实验装置的复杂性,直接对数字全息图在空域进行预处理,就可消除数字全息再现时的零级像。与一些消除零级像的现有方法相比较,该方法具有算法简单,处理速度快的优点,所提出的方法通过实验得到验证。

关键词:数字全息;零级像;图像处理

中图分类号:0438.1 **文献标识码:**A

A pre-process method based on spatial filter for zero-order image elimination in digital off-axis holography

ZHU Yu-liang, ZHOU Hao, GU Ji-hua

(Physics Department, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: Based on recording theory of digital off-axis hologram and digital image processing techniques, an effective method to eliminate zero-order image in digital off-axis holography is proposed. With this method, only single hologram is required and pre-processed in spatial domain. Comparing with the existing methods, this method has a fast and simple algorithm. It is efficient to eliminate the zero-order image. The proposed method is verified by experimental results.

Key words: digital holography; zero-order image; image processing

1 引言

数字全息技术是 Goodman 在 1967 年提出的^[1],采用 CCD 代替全息干板记录全息图,通过计算机模拟参考光数值再现物光波前,实现了全息图的记录、存储和再现的数字化。数字全息可同时记录物光场的振幅和相位信息,是一种理想的形貌和相位分布测量方法,广泛应用于形貌测量^[2]、显微观测^[3]、信息加密^[4]等领域的研究。

与普通光学全息一样,数字全息再现像包括零级像、真实像和共轭像。依据文献[5],在物光波与参考光波强度 1:1 的情况下,记录的全息图具有最好的对比度,用参考光波照射全息图再现物光波,真实像能量仅占总衍射能量的 1/6,共轭像占 1/6,零级像占 4/6。可见,要提高再现像质量,消除零级像尤为重要。

为解决这一问题,国内外的学者提出了多种消除零级像的方法,如依据离轴全息图频谱特性提出

的频域滤波法^[6],该方法只需拍摄一幅全息图,但由于需要正反两次傅里叶变换以及滤波处理,容易造成部分有用信息的丢失,且处理速度慢,不适用于实时性要求高的测量;在数字全息记录光路中引入相移技术^[7],消除零级像效果比较好,且能充分利用 CCD 的有效带宽,但需在参考光光路中加入精密的相移器,对实验装置的要求比较高,且实验中需要拍摄多幅全息图,不适用于动态物体的测量;利用全息图与其强度平均值相减的方法来消除零级像^[8],对零级像中物光自相关分量的消除效果并不理想。针对上述方法的不足,本文提出了一种消除离轴全息零级像的有效方法。该方法只需拍摄一幅全息图,不需要相移器材或其他辅助设备,仅通过对全息图在空域进行预处理,就可实现零级像的有效去除,

作者简介:朱余良(1981-),男,硕士研究生,主要从事数字全息及光信息处理方面的研究。E-mail:zyul1981@163.com

收稿日期:2010-03-15

且处理速度快。通过理论分析以及实验研究,论证了该方法的可行性。

2 理论分析

2.1 数字全息的基本原理

图1为离轴数字全息记录和再现的原理图,平面 x_0y_0 是物平面,平面 xy 是全息记录平面,平面 $x'y'$ 是再现像平面。设物光波在平面 x_0y_0 处的复振幅分布为 $O(x_0, y_0)$, 向前传播距离 d 到达记录平面 xy 时,经菲涅耳衍射的物光场分布可表示为:

$$O(x, y) = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \exp\left[\frac{jk(x^2 + y^2)}{2d}\right].$$

$$F\left\{O(x_0, y_0) \exp\left[\frac{jk(x_0^2 + y_0^2)}{2d}\right]\right\} = |O(x, y)| \cdot \exp[j\phi(x, y)] \quad (1)$$

式中, F 表示傅里叶变换; $|O(x, y)|$ 和 $\phi(x, y)$ 分别表示物光波的振幅和相位。

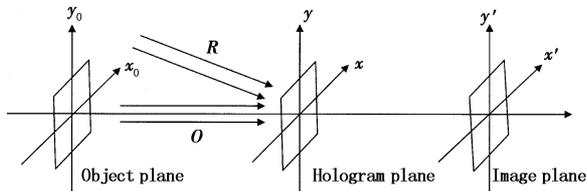


图1 离轴数字全息记录和再现示意图

实验中,若采用平面光波照明,记录平面 xy 位置处参考光复振幅分布表示为:

$$R(x, y) = A \exp[jk(x \cos \theta_x + y \cos \theta_y)] \quad (2)$$

式中, θ_x, θ_y 分别为参考光与 x, y 方向的夹角。

物光与参考光叠加后,在记录平面上的光强分布可表示为:

$$I(x, y) = A^2 + |O(x, y)|^2 + 2A|O(x, y)| \cdot \cos[(\phi(x, y) - kx \cos \theta_x - ky \cos \theta_y)] \quad (3)$$

数字全息图的记录介质是 CCD, CCD 记录的是离散的强度分布。设 CCD 的光敏面尺寸为 $L_x \times L_y$, 像元数分布为 $N_x \times N_y$, Δx 和 Δy 分别表示像元的横向和纵向尺寸。若忽略像元间隔, CCD 通过空间采样后,记录的数字全息图强度分布为:

$$I(m, n) = I_H(x, y) \text{comb}\left(\frac{x}{\Delta x}, \frac{y}{\Delta y}\right) \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right) \quad (4)$$

式中, m, n 为整数,且 $-\frac{N_x}{2} \leq m \leq \frac{N_x}{2}$, $-\frac{N_y}{2} \leq n \leq \frac{N_y}{2}$ 。

数字全息再现时采用单位复振幅平面波为照明

$$\begin{aligned} & \text{Mean} \begin{bmatrix} \cos[\phi(m-1, n-1) - \varphi(m-1, n-1)] & \cos[\phi(m-1, n) - \varphi(m-1, n)] & \cos[\phi(m-1, n+1) - \varphi(m-1, n+1)] \\ \cos[\phi(m, n-1) - \varphi(m, n-1)] & \cos[\phi(m, n) - \varphi(m, n)] & \cos[\phi(m, n+1) - \varphi(m, n+1)] \\ \cos[\phi(m+1, n-1) - \varphi(m+1, n-1)] & \cos[\phi(m+1, n) - \varphi(m+1, n)] & \cos[\phi(m+1, n+1) - \varphi(m+1, n+1)] \end{bmatrix} \\ & \approx \frac{1}{9} \sum_{i=-1,0,1} \sum_{j=-1,0,1} \cos[\phi(m, n) - \varphi(m, n) - ik\Delta x \cos \theta_x - jk\Delta y \cos \theta_y] = C \cos[\phi(m, n) - \varphi(m, n)] \quad (8) \end{aligned}$$

波前,再像面上光波的复振幅分布可表示为:

$$U(x', y') = \frac{\exp(jkd')}{j\lambda d'} \exp\left[j\frac{k}{2d'}(x'^2 + y'^2)\right].$$

$$F\left\{I(x, y) \exp\left[j\frac{k}{2d'}(x^2 + y^2)\right]\right\} \quad (5)$$

式中, d' 为再现距离,当再现距离等于记录距离时,可得到清晰的再现像。将式(4)改成离散形式:

$$U(m', n') = \frac{\exp(jkd')}{j\lambda d'} \exp\left[j\frac{k}{2d'}(m'^2 \Delta x'^2 + n'^2 \Delta y'^2)\right].$$

$$\text{DFT}\left\{I(m, n) \exp\left[j\frac{k}{2d'}(m^2 \Delta x^2 + n^2 \Delta y^2)\right]\right\} \quad (6)$$

式中, DFT 表示离散傅里叶变换,再现像面上的采样间隔 $\Delta x'$ 和 $\Delta y'$ 可表示为:

$$\Delta x' = \frac{\lambda d'}{N_x \Delta x} \quad \Delta y' = \frac{\lambda d'}{N_y \Delta y} \quad (7)$$

数字全息的再现是通过计算机对式(6)数值计算实现的。再现像包括三部分:式(3)右端第一项和第二项的再现对应零级像,第三项的再现对应真实像和共轭像。

2.2 消除零级像的原理和方法

在菲涅耳衍射区,物光在 CCD 靶面上的强度分布 $|O(x, y)|^2$ 、振幅分布 $|O(x, y)|$ 及相位分布 $\phi(x, y)$ 随 (x, y) 缓慢变化^[9]。考虑式(3)右端,第一项是参考光单独照射在 CCD 靶面上的强度分布,理想情况下是一常量;第二项是物光单独照射在 CCD 靶面上的强度分布,在菲涅耳衍射区随 (x, y) 是缓慢变化的,因此在靶面上某一像元周围的小邻域内,可认为近似不变;第三项是参考光和物光在 CCD 靶面处干涉的强度分布,在局部区域内,物光的振幅分布 $|O(x, y)|$ 及相位分布 $\phi(x, y)$ 同样可认为近似不变,其变化主要是由参考光在靶面上的相位因子 $(kx \cos \theta_x + ky \cos \theta_y)$ 引起。

若选择 3×3 的模板对全息图 $I(k, l)$ 均值滤波,结合上述分析可知,均值滤波产生的变化主要是由 $\cos[\phi(m, n) - \varphi(m, n)]$ 引起,其中 $\varphi(m, n) = km\Delta x \cos \theta_x + kn\Delta y \cos \theta_y$ 。考虑以 $\cos[\phi(m, n) - \varphi(m, n)]$ 为中心的 3×3 邻域,对其进行无权重均值滤波,并对小邻域内物光的相位分布 $\phi(m, n)$ 作近似不变处理,可得:

$$C = \frac{1}{9} [1 + 2\cos(k\Delta x \cos\theta_x) + 2\cos(k\Delta y \cos\theta_y) + 2\cos(k\Delta x \cos\theta_x - k\Delta y \cos\theta_y) + 2\cos(k\Delta x \cos\theta_x + k\Delta y \cos\theta_y)] \quad (9)$$

式(8)中, Mean 表示无权重求区域均值。在同一记录装置下, 像元尺寸 $\Delta x, \Delta y$, 光波矢量 k 以及参考光与坐标系间夹角 θ_x, θ_y 的夹角均为定值, 因此式(9)中 C 为定值。考虑到离轴全息记录光路中, 夹角 θ_x, θ_y 不可能同时为 $\frac{\pi}{2}$, 因此 $C \neq 1$ 。若全息图 $I(m, n)$ 均值滤波结果为 $I'(m, n)$, 考虑到在局部区域内, 式(3)右端第一项不变, 第二项近似不变, 将 $I_H(m, n)$ 与 $I'_H(m, n)$ 进行相减运算得:

$$I''_H(m, n) = I_H(m, n) - I'_H(m, n) \approx 2(1 - C)A|O(m, n)| \cos[\phi_0(m, n) - km\Delta x \cos\theta_x - kn\Delta y \cos\theta_y] \quad (10)$$

由式(10)结果可知, 采用式(10)对全息图在空域进行预处理, 可消除再现时的零级像, 且不改变真实像和共轭像的相位分布。该方法的实质就是基于全息图空域的高通滤波。

3 实验结果与分析

本文实验所采用的记录光路如图 2 所示。He-Ne 激光器发出波长 632.8 nm 的激光经过分束器 BS1 分为两束, 分别经扩束器 BE₁ 和 BE₂ 后, 通过针孔滤波器 Pinhole₁ 和 Pinhole₂ 空间滤波, 再由透镜 Lens₁ 和 Lens₂ 准直, 最终物光与参考光由 BS2 合束, 图中 M₁, M₂, M₃ 及 M₄ 均为反射镜。用于记录的 CCD 光敏面为 8.47 mm(H) × 7.10 mm(V), 像元尺寸为 3.45 μm × 3.45 μm, 像元数为 2456 × 2058。被记录的物体为三维实物骰子, 记录距离为 185.0 mm。

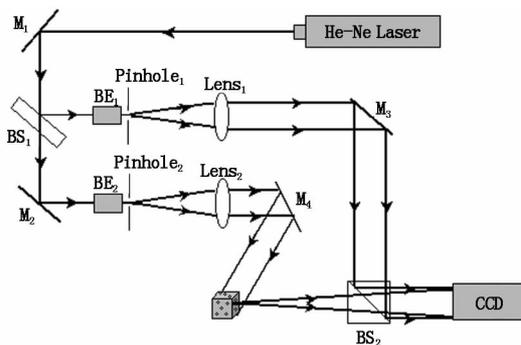


图2 离轴数字全息实验光路

实验记录的全息图及再现像如图 3 所示。图 3(b) 是全息图直接再现的结果, 零级像占据了很大的能量, 且与实像有所重叠, 严重影响再现像质。

图 3(c) 是采用本文方法预处理后的再现图, 零级像得到有效消除, 再现像的对比度得到显著提高。图 3(d) 是图 3(c) 实像的放大, 同时通过中值滤波平滑处理抑制散斑噪声^[10], 较高质量的再现了原物像。

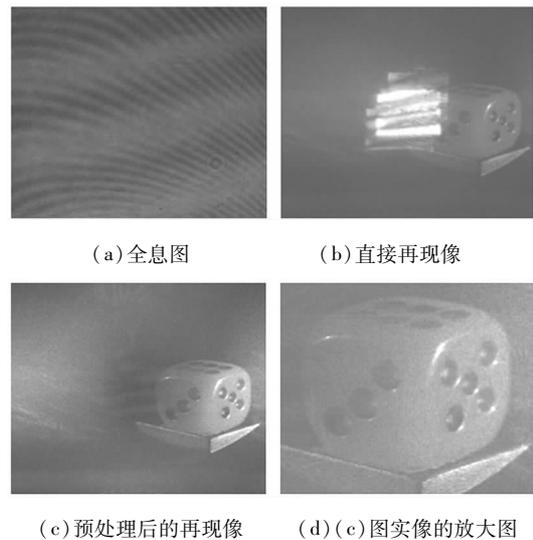


图3 实验记录的全息图及再现像

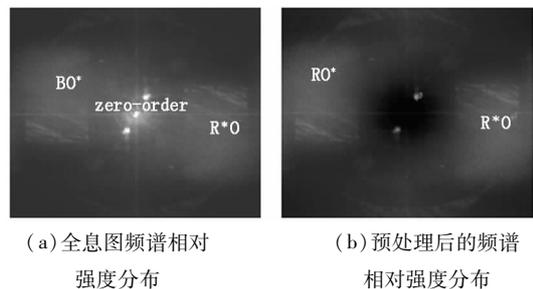
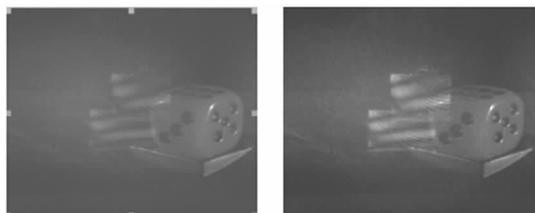


图4 频谱相对强度分布图

图 4(a) 是全息图在频域空间的频谱相对强度分布, 零级像对应的频谱能量最强, 频谱图中心两侧对称分布的小亮斑是由系统寄生干涉造成的。图 4(b) 是用本文方法对全息图预处理后频谱的相对强度分布。结果表明, 本文提出的空域滤波预处理法有效滤除了零级频谱。与频域滤波法相比, 本文提出的方法是在空域进行, 无需多次傅里叶变换, 减少了全息图有用信息的丢失, 且处理速度快。为了便于比较, 预处理程序均通过 Matlab 编程, 对本文全息图进行预处理。在相同的运行环境下, 经过测试, 若采用基于频域的巴特沃斯高通滤波法, 需耗时 256.93 s; 采用理想高通滤波法, 耗时 10.42 s; 而采用本文方法, 耗时仅 0.58 s, 显然, 本文方法大幅提高了预处理的速度, 对实时性要求高的测量有直接现实的意义。

值得注意的是, 在采用本文预处理法消除离轴全息零级像的过程中, 滤波模板不宜过大, 模板越

大,零级频谱中的高频成分越难消除。为了便于比较,在预处理过程中,分别采用 3×3 、 5×5 以及 7×7 模板,其相应预处理后的再现结果为图3(c)、图5(a)和图5(b)。与图3(c)相比,在图5(a)和图5(b)中,寄生干涉引入的高频噪声没得到较有效地图像抑制。



(a) 5×5 均值滤波模板预 (b) 7×7 均值滤波模板

图5 采用不同均值滤波模板预处理后的再现像

4 小 结

本文基于数字图像处理技术,通过理论和实验两方面的研究,提出了消除离轴数字全息系统中零级再现像的空域滤波预处理法。结果表明,该方法只需记录一幅数字全息图,不需要添加相移设备,就能快速有效地消除数字全息再现像中的零级像;与频域滤波法相比较,本文预处理法基于空域处理,无需正反两次傅里叶变换,大大降低了数据处理的复杂性,对于实现数字全息的高速和高质量的测量具有重要意义。

参考文献:

[1] Goodman J W, Lawrence R W. Digital image formulation

from electronically detected holograms [J]. Appl. Phys. Lett., 1967, 11(3): 77-79.

- [2] 葛宝臻,邹瑾,吕且妮. 基于4f系统的数字全息表面三维形貌恢复技术[J]. 天津大学学报, 2006, 39(6): 712-716.
- [3] Yong-Seok Choi, Sang-Joon Lee. Three-dimensional volumetric measurement of red blood cell motion using digital holographic microscopy [J]. Appl. Opt., 2009, 48(16): 2983-2990.
- [4] 尉迟亮,顾济华,刘薇,等. 基于数字全息及离散余弦变换的图像数字水印技术[J]. 光学学报, 2006, 26(3): 355-361.
- [5] 熊秉衡,李俊昌. 全息干涉计量——原理和方法[M]. 北京:科学出版社, 2009, 570-571.
- [6] Cuhe E, Marquet P, Depeursinge C. Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography [J]. Appl. Opt., 2000, 39(23): 4070-4075.
- [7] Takaki Y, Kawai H, Ohzu H. Hybrid holographic microscopy free of conjugate and zero-order images [J]. Appl. Opt., 1999, 38(23): 4990-4996.
- [8] 李勇,金洪震,王辉,等. 全息图数字再现中消除直射光的一种方法[J]. 浙江师范大学学报, 2004, 27(2): 122-125.
- [9] 李慧娟,王玉荣,王永瑛. 用一幅离轴菲涅耳数字全息图重建物光波的局域算法研究[J]. 光子学报, 2008, 37(4): 745-749.
- [10] Garcia-Sucerquia J, Ramirez J A H, Prieta D V. Reduction of speckle noise in digital holography by using digital image processing [J]. Optik, 2005, 116(1): 44-48.