

文章编号: 0253-2239(2008)05-0856-04

基于有限脉冲响应滤波器的数字全息零级像消除

刘雯雯^{1,2} 戴宜全^{1,2} 康新³ 杨福俊^{1,2} 何小元^{1,2}

(¹ 东南大学工程力学系, 江苏 南京 210096; ² 东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)
³ 南京理工大学工程力学系, 江苏 南京 210094)

摘要 针对数字全息中零级像的存在影响数字再现像的质量, 分析数字全息图的记录、再现原理及频谱特性, 提出了一种利用有限脉冲响应滤波器消除全息图数字再现中零级像的方法。该方法只需记录一幅数字全息图, 不需要相移器材或其他辅助设备, 直接利用数字图像处理对数字全息图在空域进行预处理, 消除全息再现时的零级像干扰。对比了数字模拟和实验拍摄到的全息图在应用有限脉冲响应滤波器消除零级像前后的再现结果, 表明该方法可消除零级衍射像, 改善重建像质量, 并且算法简单。

关键词 数字全息; 零级像消除; 有限脉冲响应滤波器; 数字再现

中图分类号 O438.1 文献标识码 A

Zero-Order Image Elimination in Digital Hologram Based on Finite Impulse Response Filter

Liu Wenwen^{1,2} Dai Yiquan^{1,2} Kang Xin³ Yang Fujun^{1,2} He Xiaoyuan^{1,2}

¹ Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

² Key Laboratory of MEMS of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

³ Department of Engineering Mechanics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract Aiming at the zero-order image's effect on the quality of reconstructed images in digital holography, by analysis of spectrum characteristic as well as recording and reconstruction theory, a method of zero-order image elimination in digital holography by using of finite impulse response (FIR) filter is proposed. The method is based on only one hologram and the digital image processing for preprocessing the digital hologram in spatial domain to eliminate the zero-order image, free of phase modulator or any other extra-equipment. The comparison of elimination zero-order image in reconstructed hologram before and after using FIR filter in digital simulation and experiment presents that this method can eliminate the zero-order image and enhance the quality of reconstructed image with a simple algorithm.

Key words digital holography; zero-order image elimination; finite impulse response; digital reconstruction

1 引言

近年来, 数字全息技术及其应用研究备受关注, 它在三维物体识别显示、三维物体表面轮廓重构、微粒场测量、流场测定、数字水印等领域都有广泛的应用^[1~7]。由于数字全息是以数字技术进行图像再现, 再现结果直接显示在计算机屏幕上, 所以屏幕上同时存在零级像、共轭像和真实像。这三束光线中

除真实像以外, 其他二者都是以杂散光形式出现, 且扩展范围很宽, 对再现像的分辨力造成很大影响, 特别是零级像, 由于占据了大部分能量而在图像的中心形成一个大亮斑, 当再现图像在屏幕显示时造成真实像暗淡致使细节难以分辨。另一方面, 由于 CCD 光敏面尺寸小、分辨力低, 使得物光和参考光之间的夹角要求非常苛刻, 限制在很小的范围(约为

收稿日期: 2007-08-10; 收到修改稿日期: 2007-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(10472026)、国家重点基础研究专项经费(2006CB300404)和江苏省自然科学基金(BK2006102)资助课题。

作者简介: 刘雯雯(1981—), 女, 河南人, 博士研究生, 主要从事光测力学方法与应用等方面的研究。

E-mail: liuw22@163.com

导师简介: 何小元(1956—), 男, 江苏人, 教授, 博士, 主要从事光测力学方面的研究。E-mail: mmhxy@seu.edu.cn

2°)以内。所以一旦记录角度很小时,即接近于同轴全息,很容易造成三个再现像重叠在一起,无法分开。即使在离轴全息中,当再现距离很近时也会出现这种现象。

为解决这一问题,迄今已提出了多种削弱或消除零级衍射和孪生像的方法,包括提高全息图衍射效率的灰度线性变换法^[8,9],用实际全息图强度减去其平均强度的平均值相减法^[10],在数字全息记录过程中加入相移技术的方法^[11],对数字全息图进行傅里叶变换去掉零级和共轭像对应频谱的频谱滤波法^[12,13]等。但是这几种方法各有不足,灰度线性变换法和平均值相减法消除全息图的零级衍射效果不太好;相移方法至少需要记录四幅相位相互垂直的参考光记录的全息图,因而不仅增加了装置的复杂性,同时也增加了对环境稳定性的要求,更重要的是这种方法不能适用于对生物细胞等非静止物体的记录;频谱滤波法是非常有效而简便的手段,但实验发现由于需要多次采用傅里叶变换和频谱滤波,再现速度变慢。

针对离轴全息图数值再现的特点,以及影响其再现像质量的最大因素即全息图的零级衍射,本文提出基于有限脉冲响应(FIR)滤波器消除数字全息零级像的数字图像处理算法。该算法只需要记录一幅数字全息图,通过简单的数字图像处理,便可消除零级衍射斑对再现像的影响。

2 数字全息图频谱特性分析

在全息图平面 αxy ,物光复振幅 O 和平面参考光复振幅 R 干涉后记录下来的全息图的光强分布可记为

$$I_H(x, y) = I_R + I_O(x, y) + R^* O + RO^*, \quad (1)$$

式中 I_R 为参考光强度, $I_O(x, y)$ 为物光强度, $R^* O$ 和 RO^* 为干涉项, $*$ 为复数共轭符号。假设将平面光 U 照射全息图用于全息图重现,则在再现平面上的光场分布为

$$\Psi(x, y) = UI_R + UI_O(x, y) + UR^* O + URO^*, \quad (2)$$

(2) 式的前两项形成零级衍射,第三和第四项形成试件的孪生像,第三项产生实像,第四项产生虚像。在离轴全息中,物光 O 和参考光 R 沿着不同方向传播到全息图平面,再现像和共轭像就有了不同的传播方向,但直透光的影响还是使再现像难于清晰地显现出来。并且由于 CCD 的尺寸有限,离轴光路会使再现像面散斑尺寸增大,横向分辨率也降低,夹角

越大,这个影响也就越明显。因此采用数字图像处理技术进行处理很重要,尤其是在采集的图像清晰度不好且要处理多幅图的场合。

假设采用参考光 $R(x, y) = \sqrt{I_R} \exp(ik_0 x)$, 与 z 轴夹角为 θ , k_0 为方向波数, $k_0 = 2\pi \sin \theta / \lambda$, 则在 αxy 平面记录下与物光干涉后的全息图光强分布为

$$I_H(x, y) = I_R + I_O(x, y) + \sqrt{I_R} \exp(-ik_0 x) O + \sqrt{I_R} \exp(ik_0 x) O^*, \quad (3)$$

在(3)式的两边同时进行傅里叶变换,得到

$$\begin{aligned} \tilde{T}_H(f_x, f_y) = & \tilde{T}_R + \tilde{T}_O(f_x, f_y) + \\ & \sqrt{I_R} \tilde{O}(f_x - k_0, f_y) + \\ & \sqrt{I_R} \tilde{O}^*(f_x + k_0, f_y), \end{aligned} \quad (4)$$

式中“ \sim ”为相应量的傅里叶变换, f_x, f_y 为 x, y 方向的频谱。(4) 式中,第一项是脉冲函数,位于空间频率平面的原点;第二项表示物光谱的自相关,其中心也位于空间频率平面的原点,若设物光的最高空间频率为 $\pm f_m$, 则第二项的宽度为 $4f_m$, 和第一项共同构成零级衍射像;第三和第四项分别为真实像的频谱和共轭像的频谱,它们在空间频率平面上的位置是相对于原点平移 $\pm k_0$ (k_0 为参考光 x 方向的空间频率),其一维情况如图 1, 图中粗线表示脉冲函数,两个圆柱形表示真实像和共轭像的频谱分布,宽度分别为 $2f_m$ 。

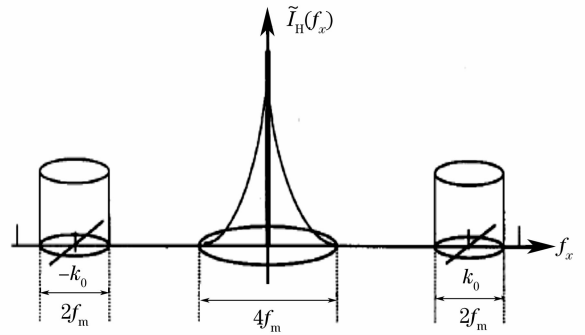


图 1 全息图的频谱分布特性

Fig. 1 Schematic diagram of hologram spectrum

3 消除零级像的原理

有限脉冲响应滤波器是在数字信号处理(DSP)中经常使用的一种基本的滤波器^[14]。它可以在设计任意幅度频率特性滤波器的同时,保证精确、严格的线性相位特性,且具有实现简单、适合于多采样率转换、具有理想的数字特性、可以用小数实现等众多优点。二维有限脉冲响应滤波器可以直接用非递归方式实现,也可用卷积(直接的或快速的)方法实现,

且它们总是稳定的,容易设计成零相移或线性相移,因而在图像处理中获得重要的应用^[15]。

由于在数字全息实验中,全息图是用 CCD 等图像传感器接收,并以数字图像格式存储于计算机中,因此可以将它看作是离散的数字信号。这样在数值再现之前,可以根据实验采集到的数字全息图的频谱(如图 2 所示)设计有限脉冲响应滤波器,空域里应用窗口傅里叶变换滤波对其进行预处理。由分析可知,在数值再现中,影响再现像质量的最大因素是物光波的自相关项及直接透过全息图的光波(零级衍射项)对 ± 1 级衍射项的干扰。针对数字全息这一特点,本文采用有限脉冲响应高通滤波器来实现数字全息图的衬比度增强,从而提高全息图的衍射效率,消除零级衍射斑对再现像的影响。

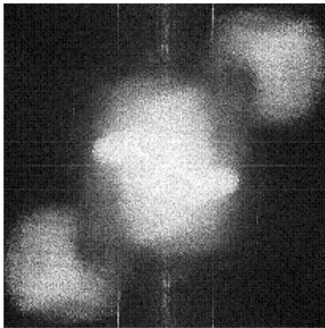


图 2 实验全息图的频谱分布

Fig. 2 Spectrum of experimental hologram

通常设计二维有限脉冲响应滤波器有窗函数法、频率抽样法、线性规划法以及频率变换法等,本文采用的是窗函数法。Matlab 软件提供了函数 F 来实现利用二维窗口方法设计二维有限脉冲响应滤波器。

$$H = F(H, W), \quad (5)$$

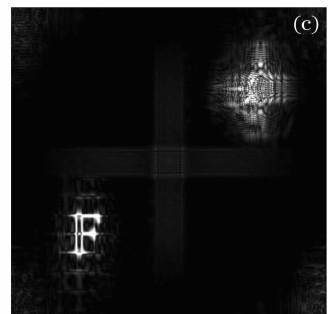
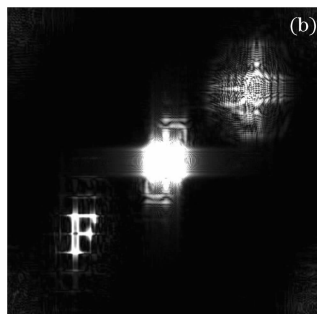
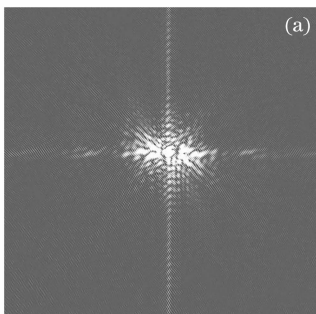


图 4 (a) 模拟全息图, (b) 初始全息图的再现像, (c) 滤波后全息图的再现像

Fig. 4 (a) Simulative hologram, (b) reconstructed image from the original hologram, (c) reconstructed image from the filtered hologram

分别比较图 4(b)、图 4(c)和图 5(b)、图 5(c),可以清楚地看到,未经处理的全息图再现像中零级像很亮,而滤波后的全息图再现像中的零级像成分被大部

式中的 H 为笛卡儿平面内等间隔点要求的频率响应, W 为窗口,它的大小控制 H 的大小。 F 可使用要求频率响应 H 的逆傅里叶变换乘以窗口 W 来产生二维有限脉冲响应滤波器。本文根据数字全息图的频谱利用 F 设计的二维有限脉冲响应高通滤波器的频率响应如图 3 所示。对比图 2 和图 3 可知,将数字全息图利用所设计的滤波器进行滤波后,再经过完全一样的再现步骤,数字再现像中的零级像就会被消除。

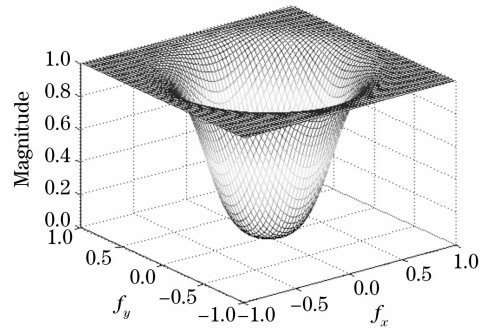


图 3 二维有限脉冲响应高通滤波器的频率响应
Fig. 3 Frequency response of two-dimensional FIR highpass filter

4 数字模拟和实验验证

为验证上述分析的正确性,本文利用有限脉冲响应滤波器分别对数字模拟和实验拍摄得到的两幅数字全息图进行滤波,并用 Matlab 语言编写了全息图数字再现程序进行再现。

图 4 为数字模拟得到的字母“F”的全息图及保留零级像和消除零级像后的再现像,图 5 为实验拍摄得到的试件“骰子”的全息图及保留零级像和消除零级像后的再现像。

分消除。虽然理论上滤波后再现像强度会稍有减弱,但是影响较小,而且实验中可以使用 Matlab 等工具来调整。与数字相减法、灰度线性变换法相比,有限

脉冲响应滤波法不存在要求物场必须为静态,故对静态和动态物场都能适用。该方法具有灰度线性变换

法可提高全息图衍射效率的优势,能够很好地削弱零级衍射斑的影响,实现实时化操作。

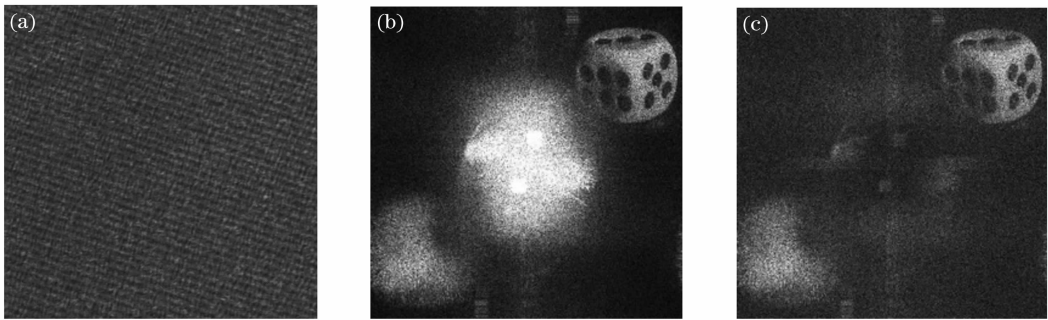


图 5 (a) 实验全息图, (b) 初始全息图的再现像, (c) 滤波后全息图的再现像

Fig. 5 (a) Experimental hologram, (b) reconstructed image from the original hologram, (c) reconstructed image from the filtered hologram

5 结 论

针对全息图数值再现的特点,引用信号分析与处理领域的有限脉冲响应滤波器,提出了一种新的图像处理算法来消除数字全息再现像中的零级像。从数字模拟和实验验证中可以看出,采用本文提出的方法,消除全息图数字再现像中的零级像成分取得了较好结果。该方法只需要记录一幅数字全息图,能够消除再现图像的零级像。此外,该方法不需要额外的装置和附加的操作手段,所有处理均由计算机完成,算法简单,能够充分利用数字全息的优点,实现物场较清晰重建和快速自动测量,将会在微结构的形貌及形变测量方面具有很强的优势。

参 考 文 献

- 1 Ge Baozhen, Zou Jin, Lü Qieni. Surface morphometry by digital holography based on $4f$ system [J]. *J. Tianjin University*, 2006, **39**(6): 712~716
葛宝臻,邹瑾,吕且妮. 基于 $4f$ 系统的数字全息表面三维形貌回复技术[J]. 天津大学学报, 2006, **39**(6): 712~716
- 2 Lü Qieni, Ge Baozhen, Luo Wenguo *et al.*. Progress of studies on digital holography and its application in particle field[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(10): 1087~1091
吕且妮,葛宝臻,罗文国等. 数字全息术及其在粒子场测试中的研究进展[J]. 光电子·激光, 2002, **13**(10): 1087~1091
- 3 Yuchi Liang, Gu Jihua, Liu Wei *et al.*. An image digital watermark technique based on digital holography and discrete cosine transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 355~361
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
- 4 Sun Liujiie, Zhuang Songlin. Identification mark of encrypted inline Fresnel holography [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(3): 402~405
孙刘杰,庄松林. 基于同轴菲涅耳全息的标识印刷防伪技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(3): 402~405
- 5 Zhou Canlin, Kang Yilan. Deformation measurement by digital holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 171~173

- 周灿林,亢一澜. 数字全息干涉法用于变形测量[J]. 光子学报, 2004, **33**(2): 171~173
- 6 Liang Jun, Gao Hongyi, He Hong *et al.*. Measuring weak phase information based on digital holographic phase difference amplification [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(4): 526~530
梁珺,高鸿奕,何红等. 基于数字全息相位差放大的弱相位检测方法[J]. 中国激光, 2006, **33**(4): 526~530
- 7 Chujun Zheng, Peng Han, Hongsen Chang. Four-quadrant spatial phase-shifting Fourier transform digital holography for recording of cosine transform coefficients [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(3): 145~147
- 8 Wang Xiaodan, Wu Chongming. *System Analysis and Design Based on Matlab-Image Processing* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000. 7~8
王晓丹,吴崇明. 基于 Matlab 的系统分析与设计——图像处理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000. 7~8
- 9 Hou Bixue, Chen Guofu. Image processing in image through scattering media using fs electronic holography [J]. *Science in China (Ser. A)*, 1999, **29**(8): 750~756
侯比学,陈国夫. 飞秒电子学全息选通透过散射介质成像技术中的图像处理[J]. 中国科学(A辑), 1999, **29**(8): 750~756
- 10 Kreis T M, Jüptner W P O. Suppression of the dc term in digital holography [J]. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(8): 2357~2360
- 11 Y. Takaki, H. Kawai, H. Ohzu. Hybrid holographic microscopy free of conjugate and zero-order images [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(23): 4990~4996
- 12 E. Cuche, P. Marquet, C. Depeursinge. Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(23): 4070~4075
- 13 Liu Cheng, Liu Zhigang, Cheng Xiaotian *et al.*. Spatial-filtering method for digital reconstruction of electron hologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 150~154
刘诚,刘志刚,程笑天等. 数字滤波法再现电子全息图[J]. 光学学报, 2003, **23**(2): 150~154
- 14 Xu Kejun, Hu Guangshu. *Signal Analysis and Processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. 151~154
徐科军,胡广书. 信号分析与处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. 151~154
- 15 Liu Ming, Xu Hongbo, Ning Guoqin. *Digital Signal Processing—Principle and Arithmetic Realization* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. 197~201
刘明,徐洪波,宁国勤. 数字信号处理——原理与算法实现 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. 197~201