

文章编号: 1000-5013(2013)02-0143-04

基于光纤和偏振图像融合的 无透镜傅里叶变换数字全息

雷莎, 陈丽, 何贤飞, 胡义华, 雷亮

(广东工业大学 物理与光电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 设计并搭建基于光纤和偏振图像融合无透镜傅里叶变换数字全息实验装置, 利用电荷耦合元件 (CCD) 记录物光波振幅、相位及偏振信息, 完成偏振图像融合和数字全息再现. 实验结果表明: 结合偏振图像融合技术的无透镜傅里叶变换数字全息能得到更为准确的数字全息图和再现像; 基于光纤的无透镜傅里叶变换数字全息不仅能产生近似球面波, 而且使物体到 CCD 的位置更自由. 此外, 偏振图像融合的方法和中值滤波器的使用, 能有效地提高再现像的分辨率.

关键词: 数字全息; 图像融合; 光纤; 傅里叶变换; 偏振; 中值滤波器

中图分类号: O 437.4

文献标志码: A

1965 年, 斯特罗克 (Stroke)^[1] 率先提出了以球面波参考光代替平行光的无透镜傅里叶变换全息. 1967 年, Goodman 等^[2] 提出了用数字方式记录和处理全息图像的数字全息技术, 随后数字全息技术逐渐在诸多领域得到应用^[3]. 无透镜傅里叶变换数字全息光路简单, 再现过程只需一次傅里叶变换, 在数字全息图的记录过程中能够有效地利用电荷耦合元件 (CCD) 的带宽, 提高再现像的分辨率. 因此, 无透镜傅里叶变换数字全息术已经受到越来越多研究人员的关注^[4]. 与非涅耳数字全息^[5] 不同的是, 无透镜傅里叶变换数字全息的参考光采用球面波而非平行光, 全息图所记录的是物光的空间频谱而非物光本身^[6-7]. 其无需知道记录距离就可以得到再现像的强度分布, 不仅能大大节约运算时间, 而且能够得到更为准确的再现像. 图像融合是将两幅或者多幅不同的图像用一定的融合方法^[8] 组合成为一幅新的图像, 融合后的图像提供了比原图像更好的性能^[9]. 偏振图像反映了物体和入射光的偏振特性, 国内外已经将偏振图像融合技术应用到军事和民用的诸多领域^[10-11]. Muller 等^[12] 利用多幅全息图叠加取平均的方法来提高再现像的信噪比, Freddy 等^[13] 通过一百张相互独立的数字全息图像的叠加, 再取得平均值, 有效地消除了散斑噪声. 本文将偏振图像融合技术应用到无透镜傅里叶变换数字全息中, 不仅消除了散斑噪声, 而且提高了再现像的分辨率.

1 无透镜傅里叶变换数字全息原理

无透镜傅里叶变换数字全息记录光路, 如图 1 所示. 设物光为 O , 参考点光源为 R , 物体与参考光位于同一平面 x_0y_0 上, X 轴在参考点光源的坐标为 $(x_r, 0)$, CCD 光敏面位于平面 xy 上, 并且 CCD 的光敏面与 Z 轴重合, 两平面之间的距离为 d_0 .

CCD 所记录的是物体的无透镜傅里叶变换全息图的空间频谱, 其再现像^[14] 可表示为

$$b(x_1, y_1) = C \exp[-i \frac{\pi}{\lambda d_0} (x_0^2 + y_0^2)] FF \{h(x, y) r(x, y) \exp[-i \frac{\pi}{\lambda d_0} (x^2 + y^2)]\}. \quad (1)$$

收稿日期: 2012-09-28

通信作者: 陈丽 (1966-), 女, 教授, 主要从事光学信息处理、光学设计、激光生物和激光光谱等方面的研究. E-mail: ggchenli@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61107029)

式(1)中: C 为复常数; FF 表示受到 $1/\lambda d_0$ 调制的二维傅里叶变换.

记录过程中,为抵消菲涅耳衍射积分中的二次位相因子,可以采用球面参考光波 $r(x,y)$ 式对其进行抵消,即

$$r(x,y) = C\exp[-i\frac{\pi}{\lambda d_0}(x^2 + y^2)]. \tag{2}$$

因此,再现像的光强可以简单地表示为

$$b(x_1,y_1) = C\exp[-i\frac{\pi}{\lambda d_0}(x_0^2 + y_0^2)]FF[h(x,y)]. \tag{3}$$

从式(3)可以看出,仅使用一次快速傅里叶变换算法,就能够再现出无透镜傅里叶变换全息图的再现像.

2 实验结果与分析

基于光纤的无透镜傅里叶变换数字全息实验光路图,如图 2 所示.实验中,选用的记录物体是一个白色的骰子(12 mm×12 mm×12 mm),半导体激光器(波长为 532 nm)发出的光经分光镜 BS 分成两束.其中一束光经过扩束镜 EP1 和准直透镜 L1 组成的扩束准直系统形成平行光波,平行光波经聚焦透镜 L2 聚焦后射入光纤端面,从光纤另一端面射出的球面波作为参考光直接射向 CCD 光敏面(像素数为 1 200×1 600,像素尺寸为 4.4 μm×4.4 μm);另一束经过全反镜 M 改变方向后,被扩束镜 EP2 扩束后直接照射物体表面,经物体反射后投射到 CCD 光敏面形成物光.两束光在 CCD 光敏面上发生干涉形成数字全息图.

光路中的 CL 是平面凹透镜,其作用是为物体提供预成像,扩大全息图的记录与再现范围.一段具有高数值孔径的单模光纤的出射端面作为参考光的点光源,与物体共面.

根据傅里叶变换的性质,无透镜傅里叶变换全息能够再现两个中心对称的再现像,可避免菲涅耳全息中对一个再现像聚焦,另一个再现像会产生离焦的问题.没有使用光纤的菲涅耳数字全息图的再现像,如图 3 所示.由图 2 所示的光路图得到的无透镜傅里叶变换数字全息再现像,如图 4 所示.

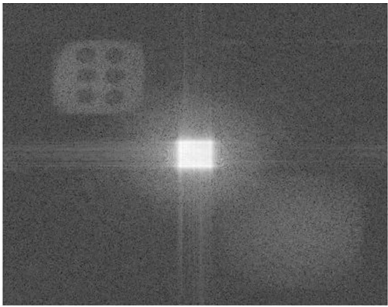


图 3 菲涅耳数字全息图

Fig. 3 hologram of Fresnel digital holography

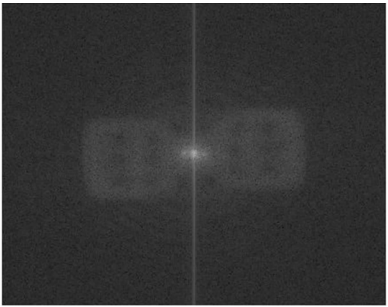


图 4 无透镜傅里叶变换全息图

Fig. 4 Hologram of lensless Fourier transform digital holography

在 CCD 前放置一偏振片记录物光的偏振信息,改变旋转偏振片的角度(θ),得到的无透镜傅里叶变换数字全息偏振图如图 5 所示.将图 5 的 6 幅图合成,可以得到偏振合成的再现像,如图 6 所示.最后,对再现像进行中值滤波^[15]处理后,即得到如图 7 所示的图像.

相比于普通的数字全息,使用了光纤的无透镜傅里叶变换数字全息具有如下 4 个特点:1) 光路装置简单、紧凑、灵活且便于使用;2) 光路中省去了透镜,可以避免由透镜带来的球面像差等非线性影响;

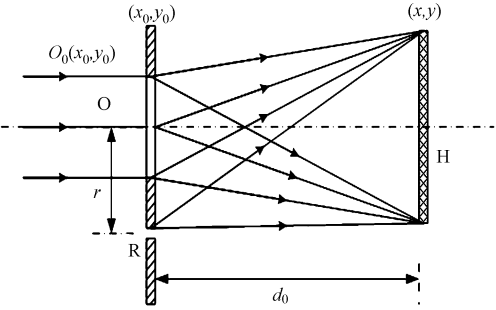


图 1 无透镜傅里叶变换数字全息记录光路图

Fig. 1 Light path for recording holograms of lensless Fourier transform digital holography

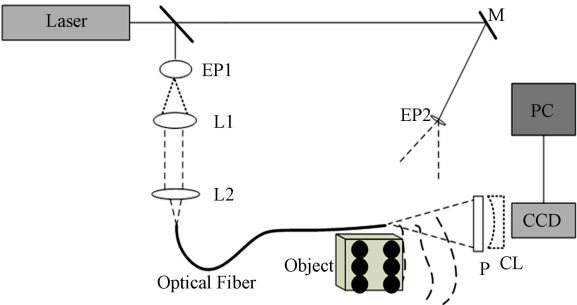


图 2 基于光纤的无透镜傅里叶变换数字全息光路图

Fig. 2 Experimental setup of lensless Fourier transform digital holography based on optical fiber

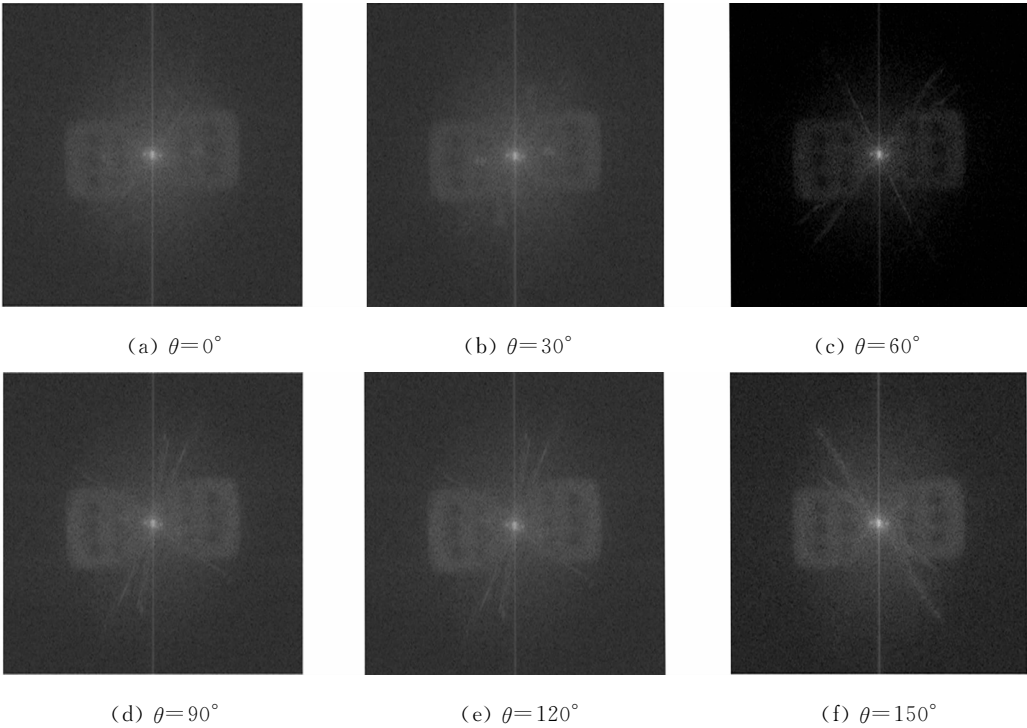


图 5 不同偏振器角度的无透镜傅里叶变换数字全息偏振图

Fig. 5 Polarization diagram of lensless Fourier transform digital holography with different polarization angle

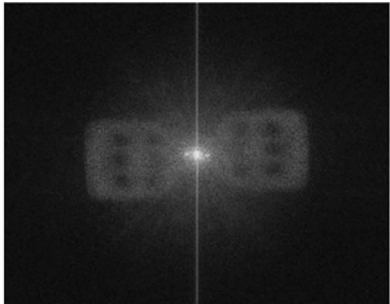


图 6 偏振合成的再现图

Fig. 6 Reconstruction after polarization image fusion

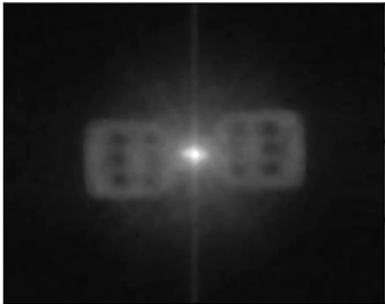


图 7 中值滤波处理后的再现图

Fig. 7 Reconstruction after median filtering

3) 无透镜傅里叶变换全息图的数值再现算法相对简单,只需进行一次傅里叶变换即可;4) 由于采用球面参考光波,得到全息图的横向分辨率较高,并能充分利用 CCD 的空间带宽等.

将高数值孔径的单模光纤引入无透镜傅里叶变换数字全息,有如下 4 点的优点:1) 光纤具有传送和扩束的功能,在布置光路时使用的元件较少;2) 能避免球面像差;3) 对环境要求不高,抗干扰能力强;4) 单模光纤纤芯直径大约为 $4\sim10\ \mu\text{m}$,其传光特性较好,输出光可以看作一个理想的点光源,无需针孔滤波器,就可以用作参考光源.

偏振片的加入是本系统与其他系统的主要区别,偏振片对入射光有遮蔽和透过的功能.从图 5~10 可以看出:加入偏振片后,再现像的光强变弱了.比较实验所得的再现像图 4 与图 6,可以证实偏振图像融合的方法在无透镜傅里叶变换数字全息实验中,不仅能记录物光的振幅、相位、偏振信息,而且能减少实验环境所产生的噪声和误差,减小图像的噪声含量,提高再现像的分辨率.由于激光散斑和其他杂散光等噪声的影响较大,实验得到的再现图的光强不均匀,局部有些不清晰.通过中值滤波后,所得到的再现像(图 7)相对光线柔和,图像较为清晰.

3 结论

采用基于光纤和偏振图像融合的无透镜傅里叶变换数字全息,不仅实验装置简单、灵活,记录了物

体的相位、振幅和偏振信息,而且能得到清晰的再现像.高数值孔径单模光纤的引用,方便消除了球面相差、噪声等的影响,提高了再现像的质量.

偏振图像融合技术减少了图像的噪声含量,中值滤波器^[14]减少了实验噪声,提高了再现像的分辨率.由于记录结果仍然受记录条件等其他因素的影响,如何消除这些因素将是进一步需要研究的问题.

参考文献:

- [1] STROKE G W. Stroke. Lensless fourier transform method for optical holography[J]. Applied Physics Letters,1965, 6(10):201-203.
- [2] GOODMAN J W, LAWRENCE R W. Digital image formulation from electronically detected hologram[J]. Appl Phys Letter,1967,11(3):77-99
- [3] 崔华坤,王大勇.无透镜傅里叶变换数字全息术中非共面误差的自动补偿算法[J].物理学报.2011(4):044201.
- [4] Li Chen,Xiao Ma. Color holographic image by using digital lensless Fourier transform holography with optical fiber. Optical Engineering[J]. 2012,51(4):045802.
- [5] 张燕,刘轩.菲涅耳全息图的数字再现方法比较[J].山东师范大学学报:自然科学版,2007,22(3):47.
- [6] ZHAO Jian-lin, JIANG Hong-zhen , DI Jiang-lei. Recording and reconstruction of a color holographic image by using digital lensless Fourier transform holography[J]. Optics Express,2008,16(4):2514-2519.
- [7] 田爱玲,薛小卫.无透镜傅里叶变换数字全息记录与再现[J].西安工业大学学报,2009,29(1):4-7.
- [8] 张德祥,张晶晶.基于 Directionlets 变换的偏振图像融合[J].电子与信息学报,2011,12(33):2795-2800.
- [9] 赵永强,潘泉.基于偏振成像技术和图像融合理论杂乱背景压缩[J].电子学报,2005,3(33):433-435.
- [10] 陈伟力,王霞.基于小波包变换的中波红外偏振图像融合研究[J].北京理工大学学报,2011,31(5):578-610.
- [11] 王新,王学勤.基于偏振成像和图像融合的目标识别技术[J].激光与红外,2007,37(7):676-678.
- [12] MULLER J,KEBBEL V,JUPTNER W. Digital holography as a tool for testing high-aperture micro-optics[J]. Optics and Lasers in Engineering,2005,43(7):739-751.
- [13] MONROY F A,GARCIA-SUCERQUIA J. Increment of lateral resolution in digital holography by speckle noise removal[J]. Optik ,2010,121(22):2049-2052.
- [14] 袁操今,钟丽云,朱越.无透镜傅里叶变换数字全息术的特点分析和讨论[J].激光杂志,2004,25(5):59-61.
- [15] 高浩军,杜宇人.中值滤波在图像处理中的应用[J].电子工程师,2004,30(8):35-36.

Lensless Fourier Transform Digital Holography Based on Polarization Image Fusion and Optical Fiber

LEI Sha, CHEN Li, HE Xian-fei,
HU Yi-hua, LEI Liang

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The experimental setup of lensless Fourier transform digital holography (LFDH) based on optical fiber and polarization image fusion is designed and presented. The phase, amplitude and polarization information of object light can be recorded by charge-coupled device (CCD), and the reconstruction of digital holography and the polarization image fusion can be realized availably. The experimental result shows that LFDH combined with polarization image fusion technology can obtained more accurate reconstruction image. By using optical fiber of high numerical aperture, not only approximate spherical wave can be acquired but also the position of object in LFDH is more free. Furthermore, polarization image fusion and median filtering algorithm are successfully used to improve the resolution of the reconstruction image .

Keywords: digital holography; image fusion; optical fiber; fourier transform; polarization; median filtering

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)