

# 基于圆偏振光干涉的相移数字全息术理论与实验研究

朱竹青<sup>1</sup> 李杨<sup>1</sup> 冯少彤<sup>1\*</sup> 王晓雷<sup>2</sup> 贡丽萍<sup>1</sup> 聂守平<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 南京师范大学物理与科学技术学院 江苏省光电技术重点实验室, 江苏 南京 210023)  
(<sup>2</sup> 南开大学现代光学研究所 光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

**摘要** 提出一种基于圆偏振光干涉的相移数字全息术, 该技术利用 1/4 波片产生左旋圆偏振的参考光和右旋圆偏振的物光, 通过精确旋转放置在 CCD 前的偏振片, 依次改变物光与参考光间的相位差, 获得四幅相移数字全息图。数值模拟分析和光学实验结果表明该技术能够有效地去除数字全息图再现像中的零级和共轭像, 再现图像质量好。

**关键词** 全息; 数字全息; 圆偏振光干涉; 四步相移术; 偏振态测量仪

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0409004

## Theoretical and Experimental Study on Digital Phase-Shifting Holography Based on Circular Polarized Light Interference

Zhu Zhuqing<sup>1</sup> Li Yang<sup>1</sup> Feng Shaotong<sup>1</sup> Wang Xiaolei<sup>2</sup> Gong Liping<sup>1</sup> Nie Shouping<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jiangsu Provincial Key Laboratory of Optoelectronic Technology, School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Optical Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China

**Abstract** Phase-shifting digital holography based on circular polarized light interference is proposed. It generates the object beam with right-rotated circular polarization and the reference beam with left-rotated circular polarization by quarter wave plate, successively changing the phase difference between the object beam and the reference beam by accurately rotating the polarizer located in front of the CCD and acquiring four digital holograms with corresponding phase changes. Numerical simulation and analysis and optical experimental results demonstrate that the method presented above can effectively remove the zero-order and conjugated images and has good-quality reconstructed image.

**Key words** holography; digital holography; circular polarized light interference; four step phase shifting technology; polarimeter

**OCIS codes** 090.1995; 260.5430; 050.5080; 120.3180

## 1 引言

自 1967 年 Goodman 等<sup>[1]</sup>提出数字全息术以来, 数字全息术已在诸如数字全息加密<sup>[2-4]</sup>、三维显示<sup>[5-8]</sup>、三维物体识别<sup>[9]</sup>、显微术<sup>[10-14]</sup>、太赫兹成像<sup>[15-16]</sup>等领域得到广泛应用, 其原理就是采用光敏电子元件代替普通光学介质来记录全息图, 从而获得一张数字全息图, 再现时通过数字计算模拟光波场的衍射过程而获得再现像。数字全息术分为离轴

与同轴两种记录方式, 前者受限于 CCD 分辨率和靶面尺寸大小, 实验难度加大; 而后者实验光路简单易调节, 但无法获得清晰再现像。若在同轴数字全息术中引入相移技术<sup>[17-18]</sup>, 通过依次改变参考光的相位而获得多幅全息图则能够有效地去除再现图像中的共轭像和零级分量, 获得清晰的再现像。目前, 相移数字全息术主要通过陶瓷的压电效应<sup>[18]</sup>、波片相位延迟特性<sup>[4]</sup>及计算全息<sup>[19]</sup>和螺旋相位板<sup>[20]</sup>衍射

收稿日期: 2013-10-15; 收到修改稿日期: 2013-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(61275133)、江苏省光电技术重点实验室开放基金(1640703061)

作者简介: 朱竹青(1976-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事数字全息术、光学信息隐藏及矢量光场等信息光学方面的研究。E-mail: njzqzhu@163.com

\* 通信联系人。E-mail: fengshaotong@njnu.edu.cn

特性来实现相移,这些相移方法的共同特点是单路改变参考光的光程。本文利用两束偏振态正交的圆偏振光通过线偏振片后,两束光之间的相移与偏振片旋转角度成2倍关系的特点<sup>[21]</sup>,提出了一种新型的相移数字全息术,该技术利用1/4波片分别产生左旋和右旋圆偏振的参考光与物光,通过精确旋转放置在CCD前偏振片依次改变物光与参考光间的相位差为 $0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$ ,从而实现四步相移数字全息。

## 2 基于圆偏振光干涉的相移数字全息术原理

基于圆偏振光干涉的相移数字全息术原理图如图1所示,激光器发出的光束经过显微物镜(MO)和透镜L进行扩束、准直,然后经由偏振分束器(PBS)分成偏振方向正交的物光和参考光。两束光经分束器(BS)耦合透过1/4波片(QWP)后形成左旋和右旋圆偏振光,再经过偏振片P后两束光相互干涉形成全息图,被CCD记录。旋转偏振片P至不同角度,则可以获得不同相移的数字全息图。

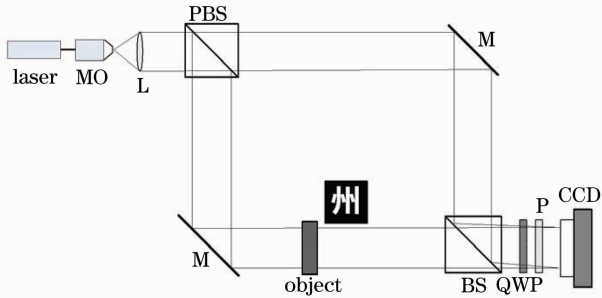


图1 基于圆偏振光干涉的相移数字全息术原理图

Fig.1 Schematic diagram of phase-shifting digital holography based on circular polarized light interference

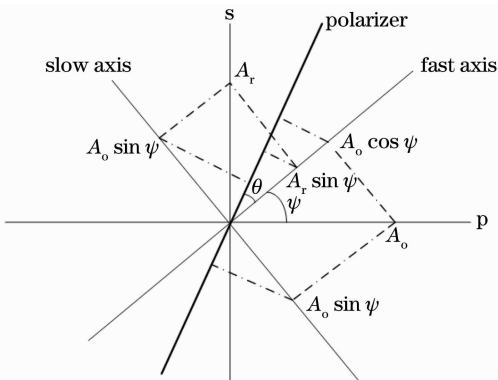


图2 偏振光干涉示意图

Fig.2 Sketch of polarized light interference

图2为两束偏振光干涉示意图<sup>[22]</sup>。不失一般

性,假设物光波为 $O=A_o \exp(j\varphi_o)$ ,沿坐标轴p方向。参考光波为 $R=A_r \exp(j\varphi_r)$ ,沿坐标轴s方向,s方向与p方向相互垂直。物光和参考光的相位差 $\Delta\varphi=\varphi_o-\varphi_r$ 。 $\psi$ 为1/4波片快轴与p轴的夹角, $\theta$ 为偏振片透振方向与1/4波片快轴的夹角, $d$ 为1/4波片厚度, $k=2\pi/\lambda$ 为波数,则波片产生的相移为 $\delta=k(n_o-n_e)d$ 。

偏振方向相互垂直的物光与参考光经过1/4波片相位延时和偏振片后,干涉场复振幅A为

$$A = [A_o \cos \psi \exp(jkn_e d) \cos \theta - A_o \sin \psi \exp(jkn_o d) \sin \theta] \exp(j\varphi_o) + [A_r \sin \psi \exp(jkn_e d) \cos \theta + A_r \cos \psi \exp(jkn_o d) \sin \theta] \exp(j\varphi_r). \quad (1)$$

获得的全息图强度分布 $I = A \cdot A^*$ ,化简后得

$$I = A_o^2 [\cos(\psi - \theta)^2 - \sin 2\theta \sin 2\psi \cos^2(\delta/2)] + A_r^2 [\sin(\psi + \theta)^2 - \sin 2\theta \sin 2\psi \sin^2(\delta/2)] + A_o A_r (\sin 2\theta \sin \Delta\varphi \sin \delta + \sin 2\theta \cos 2\psi \cos \Delta\varphi \cos \delta + \sin 2\psi \cos 2\theta \cos \Delta\varphi). \quad (2)$$

当 $\psi = \pi/4, \delta = \pi/2$ 时,物光和参考光均分别从线偏振光变为右旋和左旋的圆偏振光。则(2)式可进一步化简为

$$I = \frac{1}{2} [I_o + I_r + 2 \sqrt{I_o I_r} \cos(2\theta - \Delta\varphi)], \quad (3)$$

式中 $I_o$ 和 $I_r$ 分别为物光强度和参考光强度。从(3)式可以看出,左旋与右旋圆偏振光通过偏振片后获得的全息图强度与偏振片透振方向和1/4波片快轴间夹角的2倍有关。设全息记录平面坐标为 $(\zeta, \eta)$ ,当旋转偏振片使得 $\theta$ 角度分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 $135^\circ$ 时,可以得到相移分别为 $0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$ 的数字全息图,分别记为 $I(\zeta, \eta; 0), I(\zeta, \eta; \pi/2), I(\zeta, \eta; \pi)$ 和 $I(\zeta, \eta; 3\pi/2)$ 。根据四步相移算法,可以得到CCD靶面处物光场复振幅 $U(\zeta, \eta)$ 为

$$U(\zeta, \eta) = \frac{1}{4A_r} \{ [I_o(\zeta, \eta; 0) - I_o(\zeta, \eta; \pi)] + i [I_o(\zeta, \eta; \pi/2) - I_o(\zeta, \eta; 3\pi/2)] \}. \quad (4)$$

设物平面坐标为 $(x, y)$ ,根据菲涅耳积分衍射公式,通过对物光场 $U(\zeta, \eta)$ 反演运算,可以获得数字全息图再现像的复振幅 $O(x, y)$ 为<sup>[23]</sup>

$$O(x, y) = \frac{\exp(-jkz)}{j\lambda z} \exp[-j\lambda z(x^2 + y^2)] \times \mathcal{F} \left\{ U(\zeta, \eta) \exp \left[ -j \frac{k}{2z} (\zeta^2 + \eta^2) \right] \right\}, \quad (5)$$

式中 $x = \frac{\zeta}{\lambda z}, y = \frac{\eta}{\lambda z}$ 。

### 3 数值模拟和讨论

考虑到在实际实验中波片精度、光束偏振方向以及偏振片与波片快轴之间夹角变化等因素影响再现像质量,因此这里通过数值模拟四步相移数字全息实验,研究了相关实验参数对再现像质量的影响,为实验提供了理论依据。为便于分析问题,模拟过程中选择离轴记录方式。

假设在理想条件下,经 PBS 分束后的物光与参考光光强相等,物光与参考光偏振方向与波片快轴夹角为  $45^\circ$ ,  $1/4$  波片的延迟精度为  $100\%$ 。激光波长为  $633\text{ nm}$ ,物体到 CCD 距离为  $27.5\text{ cm}$ ,物参夹角为  $0.8^\circ$ 。CCD 大小为  $512\text{ pixel} \times 512\text{ pixel}$ ,像素大小为  $6.52\text{ }\mu\text{m} \times 6.52\text{ }\mu\text{m}$ 。模拟结果如图 3 所示,其中图 3(a)为单幅数字全息再现图,图 3(b)为利用圆偏振光干涉的相移数字全息再现图。可见,圆偏振光干涉的相移数字全息术能够有效去除再现像中的共轭像和直流分量。

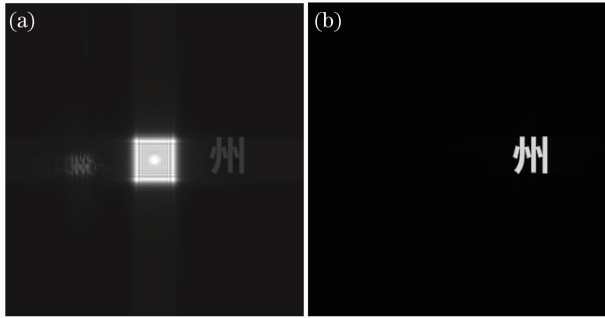


图 3 再现图。(a) 单幅数字全息;(b) 相移数字全息

Fig. 3 Reconstructed image. (a) By single digital hologram; (b) by phase-shifting digital holograms

为了考察实验参数对再现像质量的影响,引入归一化系数  $r$  和平均标准方差(MSE,  $M_{SE}$ )来进行描述。假设图像大小为  $M \times N$ ,理想条件下得到的相移数字全息再现像为  $f_1(i, j)$ ,参数变化条件下得到的相移数字全息再现像为  $f_2(i, j)$ ,其中  $i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N$ 。则两幅图像之间的归一化相关系数  $r$  和平均标准方差  $M_{SE}$  定义为<sup>[24]</sup>

$$r = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f_1(i, j) f_2(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f_1(i, j)^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f_2(i, j)^2}}, \quad (6)$$

$$M_{SE} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f_1(i, j) - f_2(i, j)]^2. \quad (7)$$

从(6)式和(7)式可以看出,相关系数的值越大,平均标准方差的值越小,两个图像的相关度越高,图像就越接近,表明实验参数的变化对再现像质量影

响小。

1) 假设经 PBS 分束后的物光与参考光光强不相等,在其他参数不变的情况下所获得的再现像与理想条件下再现像结果比较如图 4 所示。

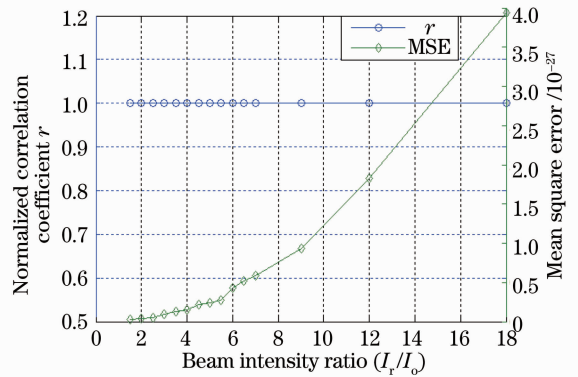


图 4 再现像质量与物参光强比对应关系

Fig. 4 Corresponding relationship between quality of reconstructed image and intensity ratio of object and reference beams

选取了 15 种参考光与物光光强比例,最小比例为  $1.5:1$ ,最大比例为  $18:1$ 。从图 4 中可以看出,不同光强比下所得到全息图与光强相等时所得到的再现图相关度为 1,平均标准方差虽有变化,但其值很小,均可视为 0。因此可见物光与参考光光强比例在所示范围内对再现像质量没有影响。

2) 假设物光与参考光偏振方向与波片快轴夹角在  $45^\circ$  附近变化,在其他参数不变的情况下所获得的再现像与理想条件下再现像结果比较如图 5 所示。

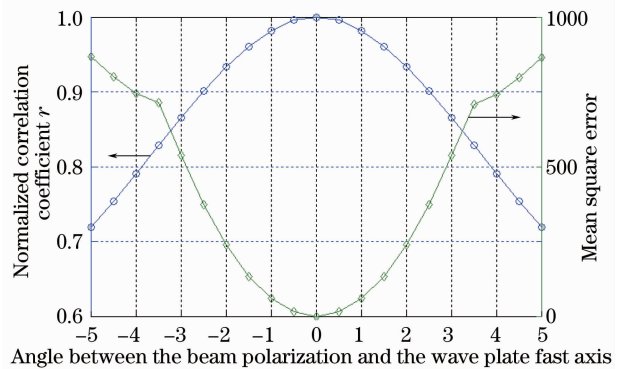


图 5 再现像质量与光线偏振方向与波片快轴方向夹角对应关系

Fig. 5 Corresponding relationship between quality of reconstructed image and angle between beam polarization and the wave plate fast axis

选取夹角在  $\pm 5^\circ$  范围内变化(即  $40^\circ \sim 50^\circ$ ),每隔  $0.5^\circ$  进行取值。从图 5 中可以看出,归一化相关系数与平均标准方差呈对称分布。随着角度变化增

大,两个值呈二次函数形式变化, $r$  变小,MSE 变大。图 6 为两种角度变化下四步相移离轴数字全息再现像,从图中可以看出,夹角角度的变化仅影响再现像中的零级成份。当角度变化为  $0.5^\circ$  时, $r = 0.98, M_{SE} = 14.3$ 。角度变化为  $5^\circ$  时, $r = 0.71, M_{SE} = 866.9$ 。因此在实际实验操作过程中,将夹角角度变化控制在  $0.5^\circ$  以内很关键。这样才能够获得高精度的左旋和右旋光,去除再现图中的直流分量。

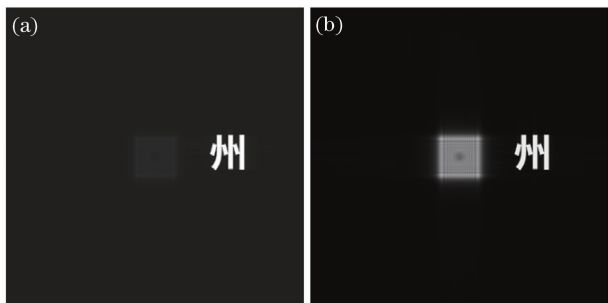


图 6 两种夹角变化情况下相移全息再现像。(a)  $0.5^\circ$ ;  
(b)  $5^\circ$

Fig. 6 Reconstructed images by phase-shifting digital holograms with two different angles. (a)  $0.5^\circ$ ; (b)  $5^\circ$

3) 考虑到  $1/4$  波片的延迟精度,如大恒或 Thorlabs 公司生产的零级波片延迟精度不大于  $\lambda/300$ ,精度高些如福建华科光电公司生产的波片精度为  $\lambda/500$ ,但价格上差距比较大,为此分析波片的精度对再现图像质量的影响很有现实意义,选取了市场能够供应的 5 种波片进行分析,所得结果如表 1 所示。

表 1 再现像质量与波片精度之间的对应关系

Table 1 Corresponding relationship between quality of reconstructed image and delay tolerance

Delay tolerance	$r$	MSE
$\lambda/50$	0.8208	715.8583
$\lambda/100$	0.9448	192.3928
$\lambda/240$	0.9899	32.7988
$\lambda/300$	0.9935	20.8373
$\lambda/500$	0.9977	7.3246

从表 1 中可以看出,当波片精度高于  $\lambda/300$ ,再现像归一化相关系数达到 0.99 以上,平均标准方差小于 21,实验室一般均能够满足再现像质量需求。

4) 相移实验的关键在于四步相移相位的精确获取,而利用偏振片方向的旋转获得相应的相位改变也将变得有难度。此处假设偏振片消光比理想,仅考虑旋转角度的变化在  $1^\circ$  (对应弧度为  $\pi/180$ ) 范围内对再现像质量的影响,探讨相移实验的可行性。若实验中四步相移  $[0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4]$  分别偏差

$\pm\pi/180$ ,则四步相移数字全息术共存在 81 种相移情况,如  $[-\pi/180, \pi/4 + \pi/180, -\pi/180 + \pi/2, 3\pi/4 + \pi/180]$ ,记为  $[-, +, -, +]$ 。通过计算发现,再现像归一化相关系数最小值为 0.994,所对应的平均标准方差在 81 组数据中虽为最大值,但也仅为 1.8103。此数据共出现过两次,对应的相位变化情况分别为  $[+, -, +, -]$  和  $[-, +, -, +]$ 。因此可以看出,当偏振片旋转角度偏差在  $1^\circ$  之内,偏振片角度带来的相移误差对实验再现结果影响最小,甚至可忽略。

## 4 实验结果

基于图 1 所示圆偏振光干涉的相移数字全息术原理,实验光路如图 7 所示。实验中所用的光源为氦氖(He-Ne)激光器,波长为 633 nm,振幅物体为“州”字,物体到 CCD 的衍射距离为 55 cm,CCD (Basler, SCA 780-54gm) 像素个数为  $785 \text{ pixel} \times 582 \text{ pixel}$ ,像素大小为  $8.3 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$ 。物光与参考光夹角为  $0^\circ$ 。

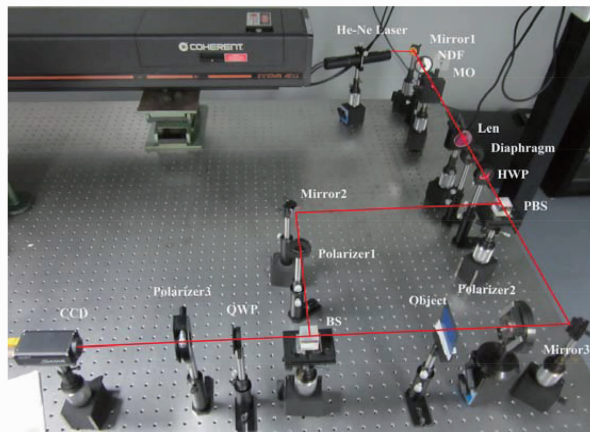


图 7 基于圆偏振光干涉的相移数字全息实验光路图

Fig. 7 Experimental light path diagram of phase-shifting digital holography based on circular polarized light interference

实验过程中,首先不放置物体,将偏振态测量仪 (Thorlabs, PAX5710-VIS) 分别置于  $1/4$  波片前面与后面,通过仔细调节光路,获得高质量的左旋和右旋圆偏振态的参考光和物光,结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出,物光与参考光偏振态接近标准圆偏振光,而且两路光的功率也接近相等。然后将二维透射型振幅物体放入光路,根据相移要求,利用精密旋转架旋转偏振片分别至  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  和  $135^\circ$ ,获得四幅相移数字全息图及其再现图如图 9 所示。

将图 9(a) 所示数字全息图和图 9(a)~(d) 所示



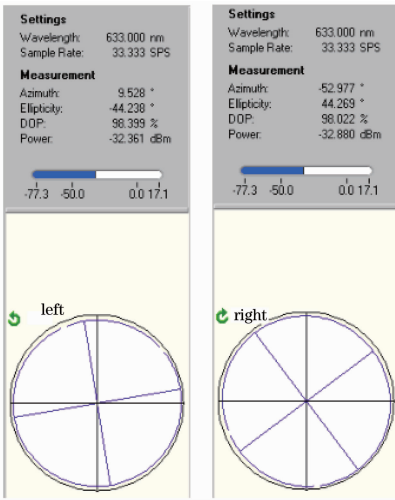


图8 利用偏振态测量仪获得高质量的物光与参考光  
Fig. 8 Measurement results of high-quality object and reference beams by a polarimeter

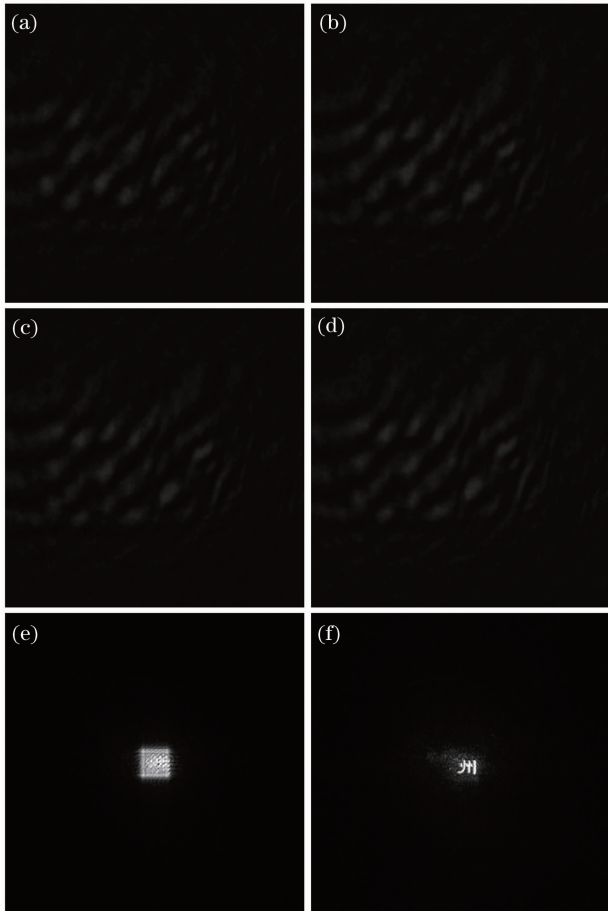


图9 相移数字全息图及其再现图(a)~(d)数字全息图；  
(e)单幅数字全息图再现像；(f)四步相移数字全息再现像

Fig.9 Phase-shifting digital holograms and reconstructed images. (a)~(d)Digital holograms; (e) reconstructed image by single digital hologram; (f) reconstructed image by phase-shifting digital holograms

四幅数字全息图分别进行再现运算,所得再现像分别如图9(e)和图9(f)所示。将单幅数字全息再现图与实验所用物体“州”字与分析,得到的归一化相关系数 $r$ 为0.436,平均标准方差MSE为243.425;而相移数字全息再现图比较后得到的归一化相关系数 $r$ 为0.8095,平均标准方差MSE为39.107。因此可以看出,相比单幅数字全息图再现像,圆偏振干涉相移数字全息术能够有效去除再现像中的共轭像和直流分量,物体“州”字清晰可见,再现像质量高。但由于光的偏振难于控制以及时间相移数字全息术的特点,图9(f)所示再现结果中仍存在少量噪声。

## 5 结 论

相移数字全息术巧妙地将相移术与数字全息结合,通过获得的多幅数字全息图提高再现像质量。从理论上分析了圆偏振光干涉实现相移的基本原理,并从实验角度出发,深入研究了再现像质量与诸如物参光强比、物光与参考光偏振方向与波片快轴夹角、波片精度及偏振片旋转精度四个参数的影响,光学实验结果验证了基于圆偏振光干涉的相移数字全息术的有效性。将该技术中CCD与放置在其前面的偏振片通过工艺进行像素级集成,使得CCD具有记录和空间四步相移功能,从而能够实现四幅相移数字全息图的瞬时记录,为诸如生物活体标本实时动态显示、微机电系统(MEMS)器件实时热效应形变测量和物体微小振动实时观测等领域中物体动态过程的表征提供了一种有效和易操作的测量方法,因此该技术具有很好的研究价值和应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 J W Goodman, P W Lawrence. Digital image formulation from electronically detected holograms[J]. Appl Phys Lett, 1967, 11 (3): 77-79.
- 2 Zhu Zhuqing, Feng Shaotong, Nie Shouping, *et al.*. Complex valued encrypted image hiding technology based on discrete cosine transform[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(1): 177-181.  
朱竹青, 冯少彤, 聂守平, 等. 基于离散余弦变换的复值加密图像隐藏技术[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 177-181.
- 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.
- 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 Kishk S, Javidi B. Watermarking of three-dimensional objects by digital holography[J]. Opt Lett, 2003, 28(3): 167-169.
- 6 Kreis T. Applications of digital holography: from microscopy to 3D-television[J]. J Eur Opt Soc Rap Pub, 2012, 7: 12006.
- 6 Geltrude A, Locatelli M, Paturzo M, *et al.*. Infrared digital holography for 3D display[C]. SPIE, 2011, 8085: 808502.

- 7 Wang Yue, Shen Chuan, Zhang Cheng, *et al.*. Research on color holographic display with space division multiplexing based on liquid crystal on silicon[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1209001.  
王岳, 沈川, 张成, 等. 基于硅基液晶的空分复用彩色全息显示研究[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1209001.
- 8 Zheng Huadong, Dai Linmao, Wang Tao, *et al.*. Optoelectronic reconstruction of three-dimensional scenes based on multiple fractional-Fourier-transform holograms [ J ]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(2): 020901.  
郑华东, 代林茂, 王涛, 等. 三维物场多重分数傅里叶变换全息图光电再现实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(2): 020901.
- 9 Javidi B, Tajahuerce E. Three-dimensional object recognition by use of digital holography[J]. Opt Lett, 2000, 25(9): 610–612.
- 10 Parshall D, Kim M K. Digital holographic microscopy with dual-wavelength phase unwrapping [J]. Appl Opt, 2006, 45(3): 451–459.
- 11 Depeursinge C D, Cuche E, Marquet P, *et al.*. Digital holography applied to microscopy[C]. SPIE, 2002, 4659: 30–34.
- 12 Wang Huaying, Liu Feifei, Song Xiufa, *et al.*. Phase aberration compensation in pre-magnification digital micro-holography with equal-curvature object beam and reference beam[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0209001.  
王华英, 刘飞飞, 宋修法, 等. 等曲率物光和参考光预放大数字全息显微术中的相位畸变补偿[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0209001.
- 13 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.
- 14 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.
- 15 Zhang Y, Zhou W, Wang X, *et al.*. Terahertz digital holography [J]. Strain, 2008, 44(5): 380–385.
- 16 Heimbeck M S, Kim M K, Gregory D A, *et al.*. Terahertz digital holography using angular spectrum and dual wavelength reconstruction methods[J]. Opt Express, 2011, 19(10): 9192–9200.
- 17 Yamaguchi I, Matsumura T, Kato J. Phase-shifting color digital holography[J]. Opt Lett, 2002, 27(13): 1108–1110.
- 18 Yamaguchi I, Zhang T. Phase-shifting digital holography [J]. Opt Lett, 1997, 22(16): 1268–1270.
- 19 Cruz M-L, Castro A, Arrizón V. Phase shifting digital holography implemented with a twisted-nematic liquid-crystal display[J]. Appl Opt, 2009, 48(36): 6907–6912.
- 20 Guo C-S, Cheng X, Ren X-Y, *et al.*. Optical vortex phase-shifting digital holography [J]. Opt Express, 2004, 12(21): 5166–5171.
- 21 Millerd J, Brock N, Hayes J, *et al.*. Modern approaches in phase measuring metrology[C]. SPIE, 2005, 5856: 14–22.
- 22 Yao Qijun. Principles of Opics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.  
姚启钧. 光学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- 23 Schnars U, Jüptner W. Digital Holography [M]. Berlin: Springer Press, 2005.
- 24 Liu Zhenhua, Yi Ping. Information Hiding Technology and Its Applications[M]. Beijing: Science Press, 2002.  
刘振华, 伊萍. 信息隐藏技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

栏目编辑: 何卓铭