

# 基于微偏振片阵列的并行相移动态数字全息 成像技术\*

樊元朋<sup>1,2</sup>, 孟浩然<sup>1</sup>, 刘欣悦<sup>1</sup>, 刘欣然<sup>1,2</sup>, 王 越<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院大学 材料科学与光电子技术学  
院, 北京 100049)

**摘 要:** 设计并实现了一种利用集成了微偏振片相移阵列的偏振相机来实现并行相移的动态数字全息成像系统。该系统利用1/4波片将参考光和测量光变为旋向相反的圆偏振光,接着利用偏振相机上的微偏振片相移阵列得到四幅相移相差 $\pi/2$ 的全息图,然后利用四步相移算法解调得到全息图上的测量光光场分布,最后利用角谱法完成图像在近场的再现。仿真和实验研究表明,该技术成功消除了零级像和孪生像的干扰,能够实时记录待测物的动态变化,快速获得微米级分辨率的再现图像。

**关键词:** 微偏振片阵列;并行相移;动态数字全息;同轴

**中图分类号:** TN26 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2020)04-0270-07

## The Technology of Parallel Phase Shift Dynamic Digital Holography Imaging Based on Micro-polarizer Array

FAN Yuanpeng<sup>1,2</sup>, MENG Haoran<sup>1</sup>, LIU Xinyue<sup>1</sup>, LIU Xinran<sup>1,2</sup>, WANG Yue<sup>1,2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, CHN; 2. College of Materials Science and Opto-electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

**Abstract:** A dynamic digital holographic imaging system using a polarization camera integrated with a micro-polarizer phase shift array to achieve parallel phase shift was designed and implemented. The system used a quarter wave plate to turn the reference light and the measurement light into circularly polarized light with opposite rotation, then used the micro-polarizer phase shift array on the polarization camera to obtain four holograms with phase shift difference of  $\pi/2$ , and then used the four step phase shift algorithm to demodulate the measurement light field distribution of the hologram, and finally used the angle spectrum method to reproduce the image in the near field. The simulation and experimental results show that the technique successfully eliminates the interference of zero-order and twin images, and can record the dynamic changes of the objects to be measured in real time, and quickly

收稿日期:2020-03-02

\* 基金项目:吉林省科技发展计划(No.20180201050SF)

作者简介:樊元朋(1994—),男,硕士研究生,研究方向为数字全息显微成像;(E-mail:ypfan5@163.com)

孟浩然(1980—),男,副研究员,硕士生导师,主要从事海洋光学探测、激光应用、光学显微成像等领域的研究;

刘欣悦(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事集成光学干涉成像、计算光学等领域的研究。

obtain the reproduced image with micron resolution.

**Key words:** micro-polarizer array; parallel phase shift; dynamic digital holography; in-line

## 引 言

数字全息<sup>[1]</sup>是现代计算机技术和光学检测相结合的产物,是一种新型的成像和测量技术,在形貌测量<sup>[2]</sup>、三维显示<sup>[3]</sup>和显微成像<sup>[4]</sup>等领域得到了广泛应用。数字全息技术是利用光电传感器件(如CCD、CMOS)代替传统的记录介质获得数字全息图,再利用计算机模拟衍射再现过程获得再现图像。根据记录光路的不同,可以分为同轴和离轴两种数字全息技术,与同轴数字全息相比,离轴数字全息对CCD的空间带宽积的利用率较低,且实验难度较大<sup>[5]</sup>。同轴数字全息结构简单、稳定性强,但是会受到零级像和孪生像的干扰,导致无法获得清晰的再现图像,且随着应用领域的不断拓宽,对动态测量的要求也越来越高。因此,如何提高同轴数字全息的成像质量和实时性是目前研究的热点<sup>[6]</sup>。研究表明,将相移技术和数字全息技术相结合的相移数字全息技术是实现快速成像、消除零级像和孪生像干扰的有效方法。

相移数字全息技术的基本原理是在光路中引入不同的相移,然后采集多幅不同相移的全息图,利用相移算法解调得到光场分布,最后利用合适的再现算法完成物光波的再现。相移技术根据引入相移方式的不同可以分为分步相移和并行相移。分步相移又被称为时域相移或时间相移,是在时间序列上通过控制精密的相移器来改变参考光的相位,然后与测量光干涉得到不同相移的全息图,是在同一空间位置的不同时刻采集全息图,主要有压电陶瓷(PZT)法、偏振相移法、液晶移相等。分步相移要求待测物体在相位改变时除相位外其它物理量保持不变,但是在实际操作过程中,由于实验操作误差、外界环境影响等因素,难以达到理论设计的要求。因此,分步相移方法局限于对静态或缓变过程的检测;而并行相移方法能够弥补分步相移方法不能实现实时动态检测的缺陷。并行相移又被称为空域相移或空间相移,是在同一时刻利用多个CCD或将一个CCD靶面分割成多个小记录面来获得多幅具有不同相移的全息图,是在同一时刻记录不同空间位置的全息图,主要有分光镜分光法、微偏振片相移阵列法等。目前,通过一次曝光

就能获得多幅不同相移全息图的并行相移数字全息成像技术受到越来越多研究者的青睐。

1974年,Bruning J H等将相移技术引入到光学检测领域,用于镜面的形貌测量<sup>[7]</sup>。1997年,日本的Yamaguchi I等首次提出相移干涉技术,并将其应用到数字全息技术中<sup>[8]</sup>。2003年,Sivakumar N R等利用分光棱镜把耦合后的光分成四路,并在各路引入不同相移,利用4个CCD来记录不同相移的干涉图,实现了并行相移<sup>[9]</sup>。2006年,Miller J等提出了采用像素化的相移阵列和探测器结合实现相移干涉的方法<sup>[10]</sup>。2008年,Toto-Arellano N I等提出利用相位网格调制不同衍射级次的光,可以获得多幅不同相移的干涉图<sup>[11]</sup>。2011年,Jang R等提出了一种双波长的相移干涉测量方法<sup>[12]</sup>。2012年,Das B等利用相位衍射光栅实现了同轴相移数字全息成像<sup>[13]</sup>。2015年,Granero L等利用移动CCD记录多幅全息图,然后对每个位置的波前进行恢复的方法来提高相移Gabor全息术的分辨率<sup>[14]</sup>。2018年,Choi K等利用线偏振片和几何相位透镜实现了消色差自干涉非相干相移数字全息术<sup>[15]</sup>。

国内对相移数字全息技术的研究也非常重视,2004年,国承山等对同轴相移数字全息中相移角大小和相移误差对再现结果的影响进行了分析研究<sup>[16]</sup>。2009年,吕晓旭等对任意相移的四步相移数字全息进行了分析和实验<sup>[17]</sup>。近些年,郑州大学的杜艳丽等在非相干相移数字全息方向做了较多工作<sup>[18]</sup>;中国石油大学的徐先锋等在真彩色广义相移数字全息方向做了大量研究<sup>[19]</sup>;笔者所在的中国科学院长春光机所的孟浩然团队正在做将相移数字全息技术应用于水下原位成像的研究。

文中针对如何快速获得高分辨率的动态再现图像,设计了一种节省空间的折叠式马赫-曾德尔结构的全息成像光路,利用嵌有微偏振片相移阵列的偏振相机,实现四步并行相移动态数字全息成像。成像系统光路中利用1/2波片来调节参考光和测量光的强度比,利用1/4波片将偏振态正交的两束线偏振光变为旋向相反的圆偏振光,微偏振片阵列的每个单元由透振方向相差 $\pi/4$ 的四个微偏振片组成,利用光透过偏振片后相移与透振角度成二倍关系的特点,同时获得四幅相移相差 $\pi/2$ 的全息图,实

现了四步并行相移,利用四步相移算法解调得到全息图上测量光的光场分布,最后利用角谱法完成物光波在近场的再现。

### 1 基本原理

并行相移动态数字全息成像系统的原理图如图 1 所示,半导体激光器发出的光束首先经过 1/2 波片(HWP),1/2 波片的作用是调节偏振光的偏振方向,从而可以调节测量光和参考光的强度比。接着经过由显微物镜(MO)、精密针孔(P)和准直透镜(L)构成的空间滤波系统进行滤光、扩束和准直,能够去除杂散光、改善空间不均匀性,提升光束质量。然后准直后的平行光束经由偏振分光棱镜(PBS)分成两束偏振方向垂直的线偏振光 P 光和 S 光,P 光作为测量光,S 光作为参考光。最后两束光经过分光棱镜(BS)耦合经过 1/4 波片(QWP)后变成左旋和右旋圆偏振光进入相机,偏振相机靶面上有如图 2 所示的 2×2 周期排列的微偏振片相移阵列,透振角度分别为  $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、 $3\pi/4$  和 0,可以得到四幅相移相差  $\pi/2$  的数字全息图。

利用琼斯矩阵来分析系统能够更直观地表示

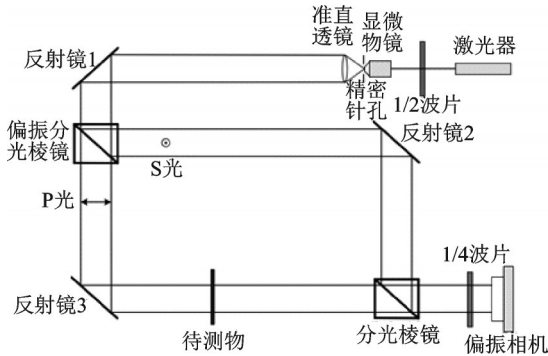


图 1 并行相移动态数字全息成像系统原理图

Fig. 1 Schematic of parallel phase shift dynamic digital holography imaging system

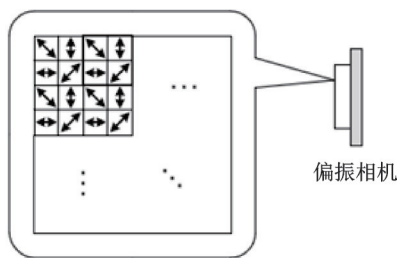


图 2 微偏振片相移阵列示意图

Fig. 2 Schematic of phase shift array of micro-polarizer

光束偏振态的变化和器件的偏振特性,因此,下面将利用琼斯矩阵对并行相移动态数字全息成像系统的原理进行分析。1/2 波片在光路中的作用主要是调节线偏振光的方向,不会改变线偏振光的偏振态,因此不对其进行琼斯矩阵的分析。

如图 3 所示,以 P 光和 S 光为坐标轴建立坐标系,1/4 波片的快轴与 P 轴的夹角为  $\theta$ ,偏振片的透振方向与 P 光夹角为  $\alpha$ 。

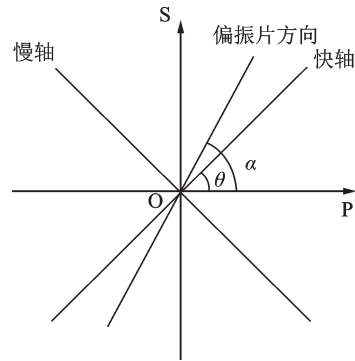


图 3 偏振光示意图

Fig. 3 Schematic of polarized light

假设测量光的琼斯矩阵为:

$$O = \begin{pmatrix} 0 \\ a \end{pmatrix} \exp(j\varphi_o)$$

假设参考光的琼斯矩阵为:

$$R = \begin{pmatrix} b \\ 0 \end{pmatrix} \exp(j\varphi_r)$$

当  $\theta = 45^\circ$  时,1/4 波片的琼斯矩阵为:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{bmatrix}$$

测量光和参考光经过 1/4 波片后:

$$O' = Q \cdot O = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ a \end{pmatrix} \exp(j\varphi_o) = \frac{a \exp(j\varphi_o)}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -j \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$R' = Q \cdot R = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b \\ 0 \end{pmatrix} \exp(j\varphi_r) = \frac{b \exp(j\varphi_r)}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$$

由上式可得,测量光经过 1/4 波片后变成了左旋圆偏振光,参考光变成了右旋圆偏振光。

偏振片的琼斯矩阵为:

$$P = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix}$$

则偏振相机记录的全息图的光场复振幅为:

$$E = P \cdot Q \cdot (O + R) =$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{pmatrix} \left\{ b \exp[j(\varphi_r - \alpha)] - ja \exp[j(\varphi_o + \alpha)] \right\}$$

令  $\varphi = \varphi_o - \varphi_r$ , 则全息图的强度为:

$$I = |E_x|^2 + |E_y|^2 = \frac{1}{2} a^2 + \frac{1}{2} b^2 + ab \sin(2\alpha + \varphi) = \frac{1}{2} I_o + \frac{1}{2} I_r + \sqrt{I_o I_r} \sin(2\alpha + \varphi)$$

式中  $I_o$  和  $I_r$  分别是测量光强度和参考光强度。从得到的全息图强度计算公式可以看出, 全息图的强度与 P 光和偏振片透振方向的夹角  $\alpha$  的两倍有关。该实验系统使用的偏振相机靶面上的微偏振片阵列上每个单元的四个透振方向分别为  $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、 $3\pi/4$  和 0, 则不同  $\alpha$  角对应的全息图强度为:

$$I_1 = \frac{1}{2} I_o + \frac{1}{2} I_r + \sqrt{I_o I_r} \cos\varphi$$

$$I_2 = \frac{1}{2} I_o + \frac{1}{2} I_r - \sqrt{I_o I_r} \sin\varphi$$

$$I_3 = \frac{1}{2} I_o + \frac{1}{2} I_r - \sqrt{I_o I_r} \cos\varphi$$

$$I_4 = \frac{1}{2} I_o + \frac{1}{2} I_r + \sqrt{I_o I_r} \sin\varphi$$

计算得:  $\varphi = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}$

全息图平面上参考光  $R(x, y)$  的分布是已知的, 计算可得全息图平面上测量光的光场分布:

$$O(x, y) = \frac{(I_1 - I_3) + j(I_4 - I_2)}{4R^*(x, y)}$$

上述解调方法叫做四步相移算法, 能够成功消除零级光  $I_o/2 + I_r/2$  和共轭像  $O^*(x, y)$  的影响。

计算得到的相机靶面上测量光的光场分布记为  $O(x, y, 0)$ , 则可以根据衍射再现过程计算距离全息图  $z$  处的任意平面上的光场分布  $O(x', y', z)$ , 完成物光波的再现。常用的图像再现方法有菲涅尔变换法、卷积法和角谱法, 三种算法的比较如表 1 所示, 菲涅尔变换法需要进行 1 次傅里叶变换, 再现速度最快, 但适用于远距离再现。卷积法需要进行 3 次傅里叶变换, 再现速度最慢。角谱法需要进行 2 次傅里叶变换, 再现速度较快, 再现图像质量高, 且无距离限制。本实验中待测物距离相机靶面较近, 图像再现时  $z$  的取值较小, 因此, 选择再现速度较快、再现图像质量高、适合近场再现的角谱法完成波前再现过程。

表 1 数字全息再现算法的比较

Tab.1 Comparison of digital hologram reproduction algorithms

再现算法	菲涅耳变换法	卷积法	角谱法
原理	标量衍射理论	标量衍射理论	衍射角谱理论
傅里叶变换次数/次	1	3	2
再现图像质量	较好	好	好
适用范围	远距离	特殊距离范围	无距离限制

根据角谱理论, 距离全息图  $z$  处的光场分布为:

$$O(x', y', z) = F^{-1} \left\{ F \{ O(x, y, 0) \} \times H(f_x, f_y) \right\}$$

式中  $H(f_x, f_y)$  为衍射的传递函数:

$$H(f_x, f_y) = \exp \left[ jkz \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right]$$

利用并行相移的方法可以同时获得四幅相差  $\pi/2$  的全息图, 一次曝光就可以利用四步相移算法解得再现图像, 再现速度够快能够使成像在时间上具有连续性, 实现对目标的实时动态检测。

## 2 实验仿真

为深入了解并行相移数字全息技术, 对离轴数字全息、同轴数字全息以及并行相移数字全息利用 MATLAB 程序进行了模拟仿真。三种数字全息技术的参数设置相同, 输入图像如图 4(a) 所示, 大小为  $256 \times 256$  像素, 像素的尺寸为  $10 \mu\text{m}$ , 再现距离为  $25 \text{ cm}$ , 激光的波长为  $633 \text{ nm}$ 。离轴数字全息的全息图和再现图像如图 4(b)、4(c) 所示, 同轴数字全息的全息图和再现图像如图 4(d)、4(e) 所示, 并行相移数字全息的四步相移的全息图和重构图像如图 4(f)~4(i)、4(j) 所示。

通过仿真结果可以得到, 同轴数字全息的结果受到了零级像和孪生像的干扰, 再现图像分辨率较低。离轴数字全息虽然能够将真实像、零级像和孪生像分离开, 但是在仿真的过程中发现需要进行比同轴数字全息更多的插补来保证有足够的带宽, 空间带宽积利用率较低, 记录的信息量也不如同轴全息多。由并行相移数字全息的仿真结果图 4(j) 可以得到, 再现图像消除了零级像和孪生像的干扰, 再现图像分辨率高, 且光路是同轴结构, 空间带宽积利用率较高。因此, 比较三种数字全息方法, 并行相移数字全息是最优的选择。

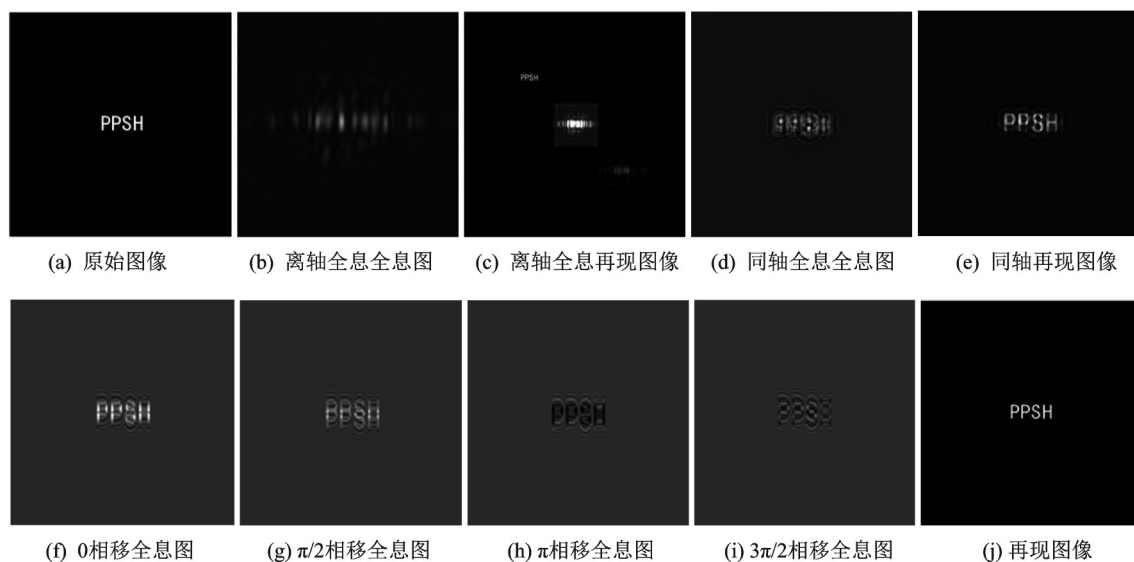


图 4 仿真结果

Fig. 4 Simulation results

### 3 实验及结果分析

根据图 1 所示的并行相移动态数字全息成像系统原理图,搭建调试的实验光路如图 5 所示。系统光路结构紧凑,调试方便。实验所用的半导体激光器波长为 635 nm,40× 显微物镜(Olympus-RMS40X)的数值孔径为 0.65,焦距为 0.6 mm,精密针孔直径为 10 μm,偏振相机(BFS-U3-51S5P-C)的大小为 2 440×2 048 像素,像素尺寸为 3.45 μm×3.45 μm,相机表面为 4 个透振角度为一个单元的微偏振片和 Sony IMX250MZR 芯片嵌合组成的微偏振片相移阵列。

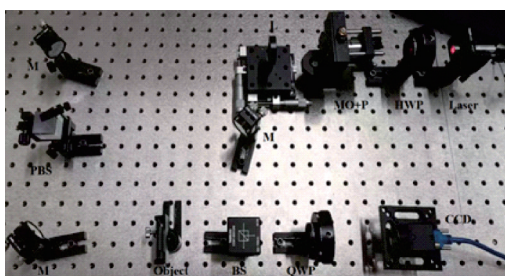


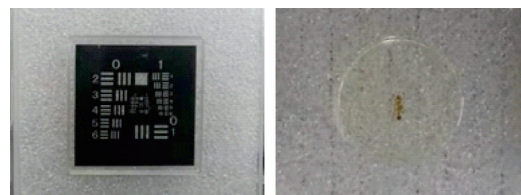
图 5 并行相移动态数字全息光路图

Fig. 5 Optical path diagram of parallel phase shift digital holography

首先暂时不放待测物,调试整套光学系统,获得高质量的准直光束,并尽量保证测量光和参考光进入相机靶面时同轴。调试完光路后,利用线偏振片检测 P 光和 S 光方向是否有偏差,然后旋转 1/4 波片,调整到正确的角度获得左旋和右旋圆偏振

光。最后放入待测物,旋转 1/2 波片来调整测量光和参考光的强度比,直到可以获得清晰、高对比度的再现图像。

选择如图 6(a)所示的光学分辨率检验板和图 6(b)所示的蚂蚁生物标本作为系统的待测物。两种待测物在某一时刻得到的四步相移全息图分别如图 7、图 9 所示,利用四步相移算法解调得到光场分



(a) 光学分辨率检验板 (b) 蚂蚁标本

图 6 待测物

Fig. 6 Objects to be measured

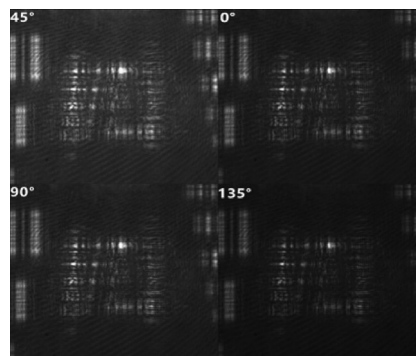


图 7 分辨率板四步相移全息图

Fig. 7 Four-step phase shift hologram of the optical resolution test board

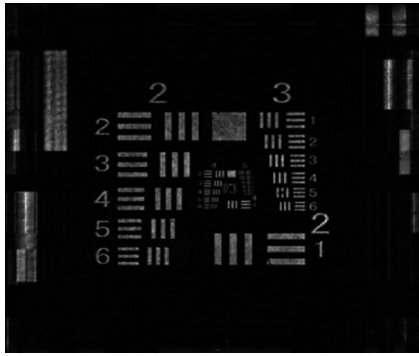


图8 光学分辨率检验板再现图像

Fig. 8 Reconstructed image of the optical resolution test board

布后,利用角谱法获得的近场再现图像分别如图8、图10所示。

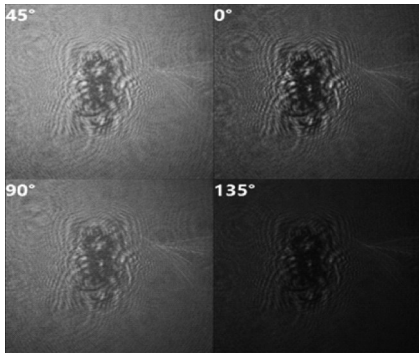


图9 蚂蚁标本四步相移全息图

Fig. 9 Four-step phase shift hologram of the ant specimen

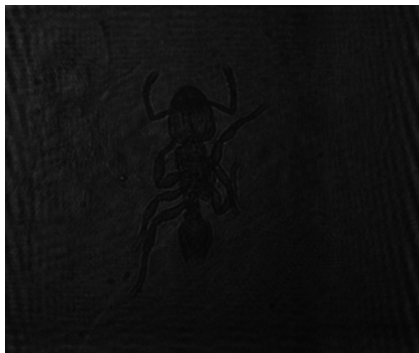


图10 蚂蚁标本再现图像

Fig. 10 Reconstructed image of the ant specimen

系统从记录全息图到计算得到再现图像大约需要13.34 ms。根据实验结果显示,两种待测物的再现图像都消除了零级像和孪生像的干扰,再现图像噪声少、对比度高。光学分辨率检验板的再现图像可以清晰地看到第5组的第一行的元素,因此,可以得到系统分辨率为32.00 lp/mm,能分辨的线宽约为15.63  $\mu\text{m}$ 。蚂蚁标本的再现图像可以清楚地

看到蚂蚁的身体特征,对研究其身体结构细节具有积极作用。

与分步相移方法相比,本系统节省了移相的时间,能够更快速地得到再现图像,当待测物移动时,在再现窗口可以实时观察到目标的动态图像。除相移方法外,美国Sequoia公司利用图像处理方法解决零级像和孪生像的干扰,在2017年推出了用于观测浮游生物的全息系统LISST-Holo2。LISST-Holo2全息系统所使用的相机像素大小4.4  $\mu\text{m}$ ,靶面尺寸为1600 $\times$ 1200像素,能够探测的最小尺寸为25  $\mu\text{m}$ ,计算获得一张再现图像大约需要50 ms。文中设计的系统与LISST-Holo2全息系统相比,再现速度提高了275%,探测面积提高了60%,分辨率提高了37.48%。

根据实验结果,发现实验系统还存在一些不足:

(1) 由于实验使用的波片是玻璃制品,实验结果受到了光折射、散射引起的噪声影响;

(2) 由于离散傅立叶变换的边缘效应,再现图像边缘出现噪声和伪影;

(3) 人工调试误差和环境误差会影响实验结果,解决误差问题可以进一步提高系统的分辨率。

## 4 结 论

设计并实现了一种同轴透射式的并行相移数字全息成像系统光路,利用嵌入了微偏振片相移阵列的偏振相机,实现了四步并行相移的动态数字全息成像。利用琼斯矩阵的方法从数学理论上分析了该系统方案的可行性,仿真和实验结果表明,并行相移动态数字全息成像系统能够成功消除零级像和孪生像的干扰,获得高分辨率的动态再现图像,具有再现速度快、稳定性强、结构简单、精度高等优点,在光学显微、光学加工制造、表面形貌测量、生命科学、医疗等诸多行业有着广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 228-311.
- [2] 闫浩, 隆军, 刘驰越, 等. 数字全息技术及散斑干涉技术在形变测量领域的发展及应用[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(06): 154-166.
- [3] 祁裕君, 张秀敏, 闫晓密, 等. 基于复振幅调制的全息视网膜显示[J]. 光电子技术, 2018, 38(01): 19-22.
- [4] 董可平, 钱晓凡, 张磊, 等. 数字全息显微术对细胞的研究

- [J]. 光子学报, 2007, 11: 2013-2016.
- [5] 吕且妮, 葛宝臻, 张以谟. 数字同轴和数字离轴全息系统分析[J]. 光电工程, 2005, 02: 15-18.
- [6] 周战荣. 实时数字全息测量温度场研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(08): 916-919.
- [7] Bruning J H, Herriott D R, Gallagher J E, et al. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses[J]. Applied Optics, 1974, 13(11): 2693-2703.
- [8] Yamaguchi I, Zhang T. Phase-shifting digital holography[J]. Optics Letters, 1997, 22(16): 1268-1270.
- [9] Sivakumar N R, Hui W K, Venkatakrishnan K, et al. Large surface profile measurement with instantaneous phase-shifting interferometry[J]. Optical Engineering, 2003, 42(2): 367-372.
- [10] Millerd J, Brock N, Hayes J, et al. Pixelated phase-mask dynamic interferometers[C]. SPIE, Tucson, America, 2006, 5531: 304-314.
- [11] Toto-Arellano N I, Rodriguez-Zurita G, Meneses-Fabian C, et al. Phase shifts in the Fourier spectra of phase gratings and phase grids: An application for one-shot phase-shifting interferometry[J]. Optics Express, 2008, 16(23): 19330-19341.
- [12] Roma J, Chu-Shik K, Jong-Ahn K, et al. High-speed measurement of three-dimensional surface profiles up to 10  $\mu\text{m}$  using two-wavelength phase-shifting interferometry utilizing an injection locking technique[J]. Applied Optics, 2011, 50(11): 1541-1547.
- [13] Das B, Joseph J, Samsheerali P T. Quantitative phase contrast imaging using common-path in-line digital holography[J]. Optics Communications, 2012, 285(6): 1062-1065.
- [14] Micó V, Granero L, Zalevsky Z, et al. Superresolved phase-shifting Gabor holography by CCD shift[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2009, 11(12): 125408: 1-125408: 6.
- [15] Choi K, Yim J, Min S W. A chromatic phase shifting self-interference incoherent digital holography using linear polarizer and geometric phase lens[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 16212-16225.
- [16] 张 莉, 国承山, 荣振宇, 等. 同轴相移数字全息中相移角的选择及相移误差的消除[J]. 光子学报, 2004, (03): 353-356.
- [17] 余清婷, 吕晓旭, 张庆生, 等. 基于任意相移量的4步相移数字全息新方法[J]. 激光技术, 2009, 33(04): 409-412.
- [18] 李德阳, 杜艳丽, 张文斌, 等. 非相干同轴数字全息成像系统研究[J]. 光电子·激光, 2015, 26(06): 1157-1161.
- [19] 徐先锋, 王 静, 焦志勇, 等. 真彩色广义相移数字全息成像设计[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(05): 67-71.

### (上接第 263 页)

并在全尺寸 110 kV GIS 设备中对 SiPM 的安装方式和检测性能进行了验证, 结果表明 SiPM 传感器在现场应用中也能取得较为优异的检测效果, 能够为光测法的现场应用提供技术支持。后续的研究将基于本系统进一步开展局部放电类型模式识别等精细化诊断。

### 参 考 文 献

- [1] 王卫东, 赵现平, 王达达, 等. GIS 局部放电检测方法的分析研究[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 13-17.
- [2] 张嘉乐, 任 重. 运行中 GIS 局部放电检测技术的实用化研究[J]. 绝缘材料, 2016, 49(02): 93-98.
- [3] 任 重, 董 明, 肖智刚, 等. 检测 GIS 局部放电的超高频微带贴片天线设计[J]. 绝缘材料, 2013, 46(005): 74-79.
- [4] IEC International Standard 60270. High voltage test techniques-partial discharge measurements[S]. International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland, 3rd edition, 2000.
- [5] Judd M D, Farish O, Hampton B F. The excitation of UHF signals by partial discharges in GIS [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(2): 213-228.
- [6] 任 明, 彭华东, 陈晓清, 等. 采用暂态对地电压法综合检测开关柜局部放电[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2460-2466.
- [7] 刘 哲, 苏 菲, 王兴振, 等. 基于分布式无线 TEV 传感器的电缆终端局部放电监测系统[J]. 电测与仪表, 2019, 56(17): 102-108.
- [8] 黎宏飞, 高宗宝, 江建明, 等. 开关柜典型缺陷模型的 TEV 和超声波法局部放电特征研究[J]. 绝缘材料, 2018, 51(05): 86-91.
- [9] Mangeret R, Farenc J, Ai B, et al. Optical detection of partial discharges using fluorescent fiber [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 26(4): 783-789.
- [10] Schichler U, Koltunowicz W, Endo F, et al. Risk assessment on defects in GIS based on PD diagnostics [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2165-2172.
- [11] Fabrikant II, Hotop H, Allan M. Elastic scattering, vibrational excitation, and attachment in low-energy electron-SF<sub>6</sub> scattering: Experiment and effective range theory [J]. Physical Review A, 2005, 71(2): 159.
- [12] Yoshida S, Kojima H, Hayakawa N, et al. Light emission spectrum depending on propagation of partial discharge in SF<sub>6</sub> [C]. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vancouver, BC, 2008: 365-368.
- [13] Krile J T, Vela R, Neuber A A, et al. Spectral analysis of pulsed volume breakdown in SF<sub>6</sub> at high pressures [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2007, 35(4): 1163-1169.
- [14] Ren M, Song B, Zhuang T, et al. Optical partial discharge diagnostic in SF<sub>6</sub>, gas insulated system via multi-spectral detection [J]. ISA Transactions, 2018, 75: 247-257.
- [15] 李 亮, 龚光华. 硅光电倍增管的新发展[C]. 第十五届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集, 贵州, 贵阳, 2010, 245-250.
- [16] Corsi F, Dragone A, Marzocca C, et al. Modelling a silicon photo-multiplier (SiPM) as a signal source for optimum front-end design [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A (Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment), 2007, 572(1): 416-418.