

# 彩色数字全息检测的实时无颜色串扰采集技术研究

杨文明 宋庆和 张亚萍 桂进斌 楼宇丽 李俊昌

昆明理工大学理学院激光所, 云南 昆明 650500

**摘要** 提出一种基于 Foveon CCD 的实时无颜色串扰的彩色数字全息干涉计量方法。针对当前实时彩色数字全息图中存在颜色串扰的问题, 分析了 Foveon CCD 的工作原理与控制模式, 对变换颜色矩阵消除颜色串扰方法作了相应的分析, 提出通过改变 CCD 的颜色变换矩阵的方法, 可以有效降低了颜色串扰对彩色数字全息的影响。实验结果及实验数据表明, 一定条件下, 通过该方法能实现实时无颜色串扰彩色数字全息图采集, 对彩色数字全息实时检测有一定的应用价值。

**关键词** 全息; Foveon X3; 颜色串扰; 实时采集

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.030901

## Research on the Non Color Aliasing Real-Time Acquisition with Color Digital Holography Measurement

Yang Wenming Song Qinghe Zhang Yaping Gui Jinbin Lou Yuli Li Junchang

Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China

**Abstract** This paper presents a method for non color aliasing real-time color digital holographic interferometry based on Foveon CCD. The control mode of CCD is ameliorated and color aliasing is decreased consumedly. The influence on color hologram becomes very little. Experimental results confirm the suitability of the proposed method, where, color aliasing can be eliminated in phase difference detecting.

**Key words** holography; Foveon X3; color aliasing; real-time acquisition

**OCIS codes** 090.1705; 090.1995; 090.5694

## 1 引言

彩色数字全息是基于三基色原理, 利用红、绿、蓝(RGB)三色彼此不相干的激光同时照明物体, 记录及再现彩色的三维(3D)全息图像。目前国内外都有彩色数字全息图像采集技术的研究, 其主要分为两大类: 一类是用单色 CCD 分别记录不同波长(红、绿、蓝)的三幅单色数字全息图<sup>[1-3]</sup>, 然后根据单色光重建分别对三幅数字全息图进行数值重建, 而将三幅单色重建图像根据红、绿、蓝的像素和强度来匹配合成一副彩色图像, 此方法拍摄的光学系统相对较简单, 但是不能满足彩色数字全息的实时性; 另一类是用彩色 CCD 同时记录红、绿、蓝三色光波的一副全息图<sup>[4-5]</sup>, 其重建过程与分别记录的大致相同, 虽能满足实时采集, 但是颜色串扰、颜色失真的问题, 使拍摄的全息图没有使用价值。全息检测技术作为当前全息术的一项重要应用, 同时也是无损检测的一种主要手段, 已经广泛地应用到了航空航天、军事、高精度加工等领域<sup>[6]</sup>, 而彩色数字全息检测技术是基于全息检测技术的一项重要发展, 能够通过三个不共面位移矢量信息的获取, 实现对微小物理量的定量描述。在彩色数字全息检测技术中, 最终物理量的获取通常是通过三色光的分量求相位差, 并进行相位解包裹求解, 但是颜色串扰的存在使得全息图的数值计算结果无法满足检测所要求。

为了实现无颜色串扰的彩色数字全息图实时采集, 国内外科研工作者都做了许多研究, Jiang 等<sup>[7]</sup>通过

收稿日期: 2014-10-08; 收到修改稿日期: 2014-10-21; 网络出版日期: 2015-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(61007061)、云南省自然科学基金面上项目(2013FB025)

作者简介: 杨文明(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事彩色数字全息检测方面的研究。E-mail: 418785139@qq.com

导师简介: 宋庆和(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事彩色数字全息检测方面的研究。

E-mail: songqinghe@126.com(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

应用合成孔径技术,实现了较高分辨率彩色数字全息图的拍摄,但是依然不能满足彩色数字全息检测多角度拍摄的要求,Lin等<sup>[8]</sup>通过颜色校正消彩色数字全息图像的颜色失真问题,但主要是通过后期数字图像处理,不能满足检测的实时性,Yamaguchi等<sup>[9]</sup>通过参考光相位改变,拍摄的彩色数字全息图,虽然颜色串扰现象已被消除,但仍存在一定程度的颜色失真。

本文就实时彩色数字全息颜色串扰的问题,提出使用Foveon X3型CCD,通过二次开发,优化的CCD控制方式,改变CCD的颜色变换矩阵,同时用红、绿、蓝三色激光照射物体,用一个Foveon X3 CCD记录彩色全息图,实验结果表明可直接记录色彩较好的彩色数字全息图,且在记录全息图时产生的颜色串扰失真相对较小。对全息图的实验结果进行了重建等数值处理,单色再现图像、彩色图像、相位差图及相位解包裹结果,都已经达到了彩色全息拍摄和多波长数字全息检测的要求。

## 2 Foveon X3 CCD消除颜色串扰研究

Foveon X3感光元件利用了硅晶元被光线穿透时会根据不同的波长在不同的深度吸收,可以同时侦测红、蓝、绿三种光波的强度,比传统感光元件拥有更加锐利以及真实的颜色,三层像素结构如图1所示。且每个硅晶元的厚度只有不到5 mm,所以对于对焦和色差影响甚微。

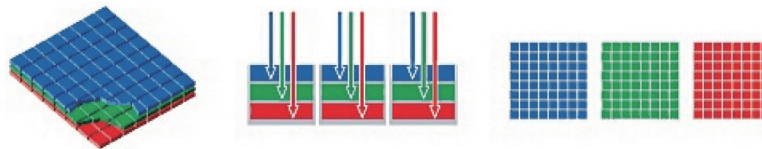


图1 像素的三层结构

Fig.1 Three layers structure of pixel

Foveon X3采集的彩色图像并不需要去马赛克,其感光元件中的每个像素都可以完整地采集三原色的强度,Foveon X3图像传感器可以用来拍摄彩色数字全息图。但是三层像素在分别采集各色光谱时并不是完全互不干扰的,红、绿分量在蓝色感光层会被吸收一部分,红、蓝分量在绿色感光层也会被吸收少许,而蓝色分量在红色感光层被吸收的几率很小,只有绿色分量会被红色感光层吸收一部分,所以通过Foveon X3 CCD拍摄的全息图,通过分别对各颜色分量的全息数值重建后会看到明显“重影”。这样造成相位差图条纹混乱,很难进行下一步数值计算,且合成的彩色图像也严重失真。

大多数的彩色CCD是通过在单元像素上安置Bayer滤波片消除颜色串扰及颜色失真,但是这样会降低彩色图像的分辨率,不足以满足当前所需的拍摄及检测要求。Foveon X3 CCD消除颜色串扰不同于“Bayer滤波型”和“RGB型”CCD,因为其像素结构的特点,可以在CCD感光单元捕获光电信息后,图像生成过程中直接进行噪声抑制、色彩变换等处理。Foveon X3 CCD的色彩变换主要以计算颜色变换矩阵来优化色彩输出以达到消串扰的目的。其计算模块有两组数据处理通道,用于存储、计算、传输图像数据,为获取校正颜色的变换矩阵,在计算模块中,需要先将Foveon X3 CCD感光单元捕获的电信号转换到标准的色彩空间CIEXYZ,再将系统内参考的彩色图像转换到CIEXYZ,并将二者对应作比较<sup>[10-11]</sup>,颜色变换矩阵的计算式为

$$U_{XYZ} M_C = U_{xyz} \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_N & Y_N & Z_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & z_N \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $x_i, y_i, z_i$  和  $X_i, Y_i, Z_i$ , 分别表示Foveon X3 CCD所拍摄图像和参考图像的色彩值,  $i = 1, \dots, N$ ,  $M_C$  是校正矩阵,表示色彩的失真程度。

在拍摄彩色数字全息图过程中,按照已有的模式直接拍摄时,颜色变换矩阵不能准确地进行颜色校正并消除颜色串扰,对此进行了实验和重建计算验证。对于Foveon X3型CCD,其颜色变换矩阵所对应的红、绿、蓝三色光的波长是固定不变的,因此,为了获取较为合适的颜色矩阵,在已知光学系统的情况下,通过上述原理重新计算出新的变换矩阵参数,并基于CCD二次开发系统,改变CCD的工作模式,将新的变换矩阵参数加载到新的工作模式下颜色校正模块中。拍摄结果表明,颜色串扰现象在此情况下得到了很好的抑制,彩色数字全息图和数值重建图像的质量有明显的改善。

### 3 彩色数字全息实验结果

实验装置如图2所示。三种颜色激光束分别经过一个半波片(HWP),对水平和垂直两个偏振方向上的光波强度进行调整,每种颜色激光经偏振分光棱镜(PBS)分成偏振方向互相垂直的两束光,一束光经过扩束后,照明被测物体,物体的散射光场直接投射到 CCD 上;另一束光经过扩束后作为参考光,并将三种颜色的参考光合为一束。参考光波经过半反半透镜(BS)反射后与  $z$  轴形成一个微小夹角,再与物光场叠加,产生傍轴干涉场。

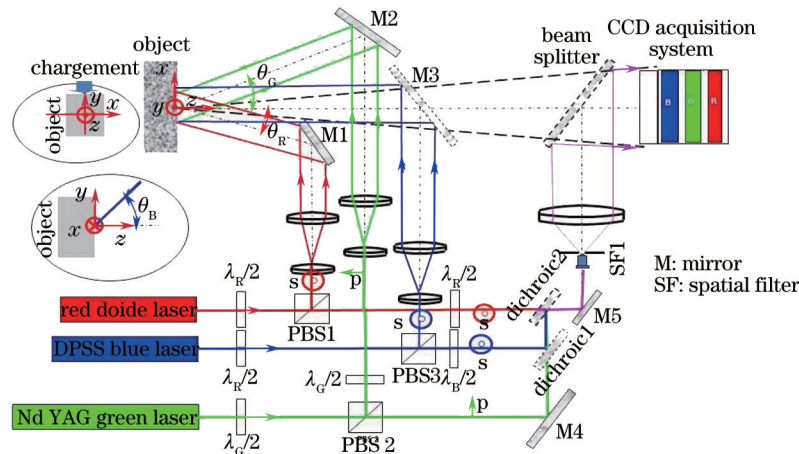


图2 彩色数字全息实验光路

Fig.2 Color digital holographic 3D detection system for big objects

实验中用的试件是一个  $35\text{ mm} \times 25\text{ mm}$  的铝板,带有 2 个孔洞。光源的波长,绿光  $\lambda = 532\text{ nm}$ , 红光  $\lambda = 671\text{ nm}$ , 蓝光  $\lambda = 457\text{ nm}$ , 记录距离是  $1630\text{ mm}$ , 彩色数字全息图由 Hanvision HVDUO-5M Camera 记录,是基于 Foveon X3 的彩色 CCD,其点阵数为  $1280\text{ pixel} \times 1024\text{ pixel}$ ,点距为  $5\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$ 。CCD 默认的工作模式 Unit matrix,在默认颜色矩阵情况下,拍摄的彩色数字全息图利用可变放大率波前重建算法分别对全息图中红、绿、蓝三种色光进行重建,并形成彩色数字全息结果,如图3所示。

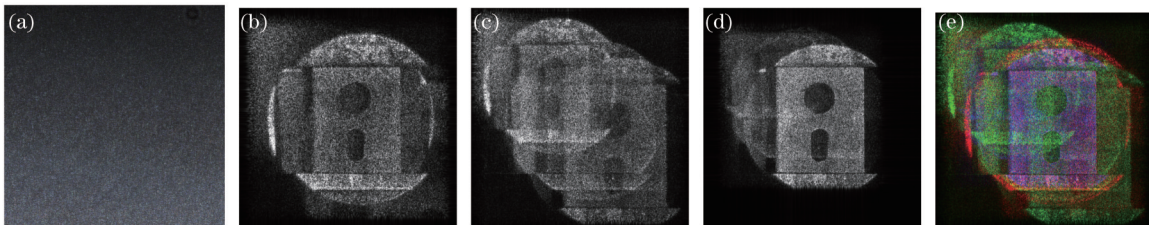


图3 Unit matrix 模式下全息图及重建图像。(a) 彩色数字全息图; (b) 重建后的红色分量; (c) 重建后的绿色分量; (d) 重建后的蓝色分量; (e) 彩色合成图像

由图3可以清晰地看出,绿光明显地存在于三种颜色分量中,对蓝色和红色分量造成干扰,同样蓝色和红色也同绿色分量叠加在一起。合成的彩色图像“重影”现象明显存在,无法看清拍摄物体的实际轮廓,这和通常的 Bayer 模式的彩色 CCD 形成了类似的结果,使得结果不可用。为了使其适用于彩色数字全息,必须能够使得三种颜色分量尽可能地分开,研究了 Foveon 的颜色矩阵,在原有模式下,颜色失真的情况几乎不存在,但是存在明显的颜色串扰现象,所以获取了新的颜色矩阵后,通过控制系统二次开发,改变变换矩阵,针对上述三个波长的激光进行了相应实验研究,得到了完全不同的结果,再根据铝板形状及尺寸,应用数字图像处理提取图像的有效信息部分,如图4所示。

由图4可以看出,颜色串扰现象大大地减弱了,红、绿、蓝三色分量数字重建结果已经达到记录所需要求,且合成的彩色重建图像较未改变颜色矩阵条件拍摄的结果,有着明显的改善,红、绿、蓝三色分量相互干扰基本被消除。因此,上述结果表明,通过此方法能够记录到高质量的彩色数字图像。为了进一步说明颜色串扰已经得到很好的抑制,该模式很好地适用于彩色数字全息检测,进行了如下实验,对铝板一端进行加



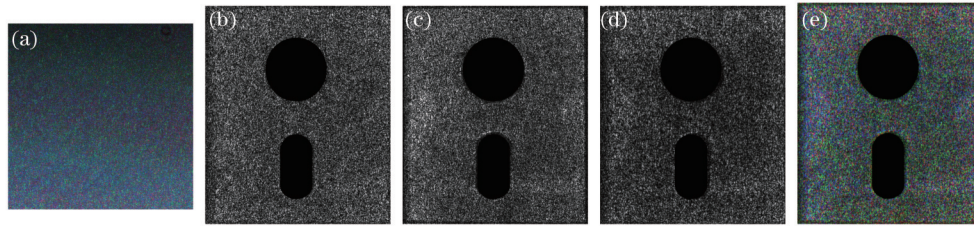


图4 改变颜色变换矩阵模式下全息图重建图像。(a) 彩色全息图; (b) 红色分量; (c) 绿色分量; (d) 蓝色分量; (e) 彩色合成图像  
 Fig.3 Reconstructed images with the corrected color matrix. (a) Color digital hologram; (b) reconstructed image of red light; (c) reconstructed image of green light; (d) reconstructed image of blue light; (e) color image composed by the three light

压,分别记录加压前后的彩色数字全息图,通过两个不同状态间的相位差来观察铝板的形变情况。在 Unit matrix 模式下,实验结果如图5所示。

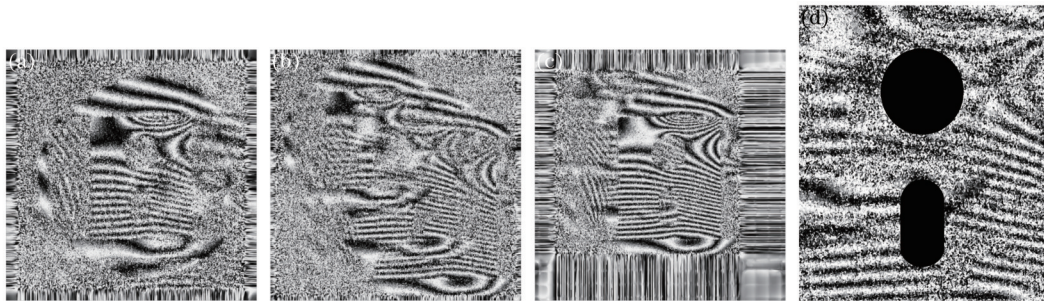


图5 Unit matrix 模式下加压前后相位差图像。(a) 红色分量; (b) 绿色分量; (c) 蓝色分量; (d) 提取的绿色分量有效信息  
 Fig.5 Changing pictures of phase with the Unit matrix mode. (a) Phase changing picture of red light; (b) phase changing picture of green light; (c) phase changing picture of blue light; (d) extracted effective information of green light

由图5可以看出,在相位差的条纹图中,因为颜色串扰的影响,条纹之间相互混叠,各分量之间相互混跌。再对改变颜色变换矩阵后拍摄的彩色数字全息图,加压前后的相位求相位差,实验结果如图6所示。

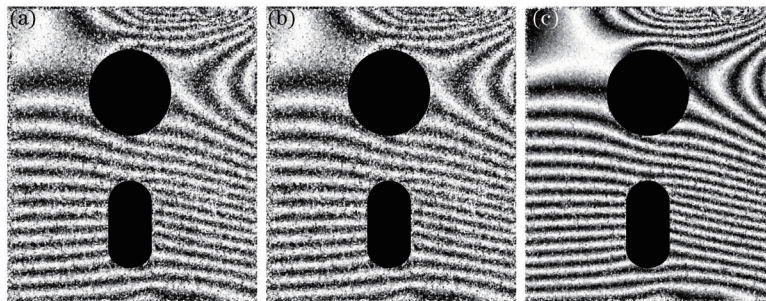


图6 改变颜色矩阵模式下加压前后相位差图像。(a) 红色分量; (b) 绿色分量; (c) 蓝色分量  
 Fig.6 Changing pictures of phase with the corrected color matrix. (a) Phase changing picture of red light; (b) phase changing picture of green light; (c) phase changing picture of blue light

从图6中红、绿、蓝三色相位差图像可以看出,三色光分量的相位差条纹图,其条纹清晰,分量之间互不混叠,颜色串扰已经不存在于相位差中。对比在 Unit matrix 模式下,加压前后相位差条纹,尤其是如图5(d)所示绿色分量有效信息部分,可以看出,条纹信息严重紊乱,无法进行相位解包裹运算,不能满足相位检测的要求。

在彩色数字全息系统中,使用彼此不相干的三种波长激光从三个方向同时照明物体,能够获得三个不共面的位移矢量,其中包含了充分的三维位移场信息,只要对相位分布图像解读,即可重构出三维位移场。为了验证该方法对于相位检测应用的可行性,利用最小二乘相位解包裹方法进行相位解调<sup>[12-13]</sup>,根据矢量合成原理计算出三维位移场。计算结果如图7所示。

由图7可以看出,铝板在进行加压后产生了形变,沿  $x$  方向的最大位移为  $8 \mu\text{m}$ ,沿  $y$  方向的最大位移为  $9 \mu\text{m}$ ,而沿  $z$  方向的最大位移为  $7 \mu\text{m}$ 。上述结果表明,该方法获得的彩色数字全息图,可以满足实时相位检测的要求。

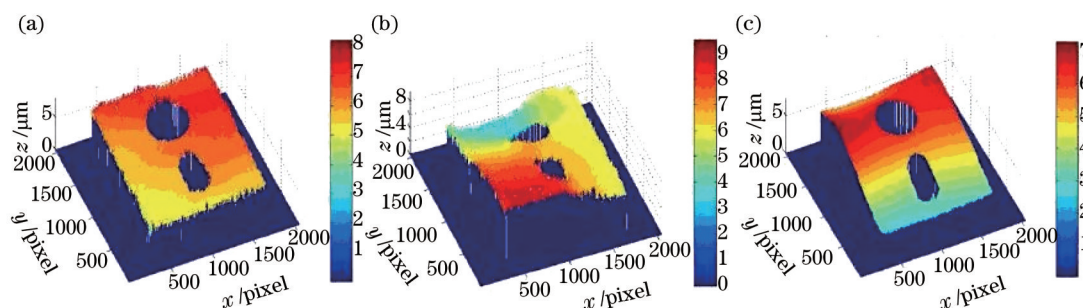


图7 三个坐标方向的位移场分布。(a)沿 $x$ 方向位移场;(b)沿 $y$ 方向位移场;(c)沿 $z$ 方向位移场

Fig.7 Straining field of the three coordinate detections. (a) Straining field of  $x$  coordinate direction; (b) straining field of  $y$  coordinate direction; (c) straining field of  $z$  coordinate direction

## 4 结 论

彩色数字全息在微小物理量检测中具有很好的研究和应用前景,但颜色串扰的问题严重影响了该方法的实时性。提出了基于 Foveon CCD 改进的彩色数字全息图像实时记录方法,该方法通过改进 Foveon CCD 颜色矩阵及控制系统,解决了彩色数字全息检测实时采集中颜色串扰的问题。实验结果表明,用该方法拍摄的彩色数字全息图,可以很好地重建出红、绿、蓝三个分量的再现像和相位差图,以及计算出三个坐标方向的位移分布图,说明通过此方法,在一定条件下,使用 Foveon CCD 进行实时彩色数字全息拍摄并应用到检测领域切实可行。

## 参考文献

- Zhang Wei, Lü Xiaoxu, Yang Fengtao, *et al.*. Multi-wavelength digital holography recorded by monochrome reconstructed image display[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(11): 2003-2007.  
张 维, 吕晓旭, 杨锋涛, 等. 单色 CCD 记录多波长数字全息图及再现像彩色显示[J]. *光子学报*, 2007, 36(11): 2003-2007.
- Li Junchang. Introduction of digital color holographic wavefront reconstruction algorithm[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(5): 0501001.  
李俊昌. 彩色数字全息波前重建算法概论[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0501001.
- Tomohiro Kiire, Daisuke Barada, Jun-ichiro Sugisaka, *et al.*. Color digital holography using a single monochromatic imaging sensor[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(15): 3153-3155.
- Lou Yuli, Li Junchang, Gui Jinbin, *et al.*. Analysis of influence caused by lens's chromatic aberration in color digital holographic system[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0409001.  
楼宇丽, 李俊昌, 桂进斌, 等. 彩色数字全息系统中透镜色差影响的研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0409001.
- Patrice Tankam, Pascal Picart, Denis Mounier, *et al.*. Method of digital holographic recording and reconstruction using a stacked color image sensor[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(3): 320-328.
- Dai Rong. Expanding use of lasers in nondestructive testing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2000, 37(6): 1-4.  
戴 蓉. 激光技术在无损检测领域的应用与发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2000, 37(6): 1-4.
- Jiang Hongzhen, Zhao Jianlin, Di Jianglei. Digital color holographic recording and reconstruction using synthetic aperture and multiple reference waves[J]. *Opt Commun*, 2012, 13(5): 3046-3049.
- L C Lin, Han Y Tu, Chau J Cheng. Color correction for chromatic distortion in a multi-wavelength digital holographic [J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(5): 055401.
- Ichirou Yamaguchi, Tatsuki Matsumura, Jun-ichi Kato. Phase-shifting color digital holography[J]. *Opt Lett*, 2012, 27(12): 1108-1110.
- Shao Feng, Jiang Gangyi, Yu Mei, *et al.*. A multi-view automatic color correction system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(5): 830-834.  
邵 枫, 蒋刚毅, 郁 梅, 等. 一种多视点视频自动颜色校正系统[J]. *光学学报*, 2007, 27(5): 830-834.

- 11 Paul M Hubel. Foveon technology and the changing landscape of digital cameras[J]. Society for Imaging Science and Technology, 2005, 13(4): 314-317.
- 12 Zhang Yizhuo, Wang Dayong, Zhao Jie, *et al.*. Investigation on phase unwrapping algorithms in digital holography[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3323-3327.  
张亦卓, 王大勇, 赵 洁, 等. 数字全息中实用相位解包裹算法研究[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3323-3327.
- 13 Zhang Zhihui, Wang Huaying, Liu Zuoqiang, *et al.*. Phase unwrapping algorithms based on fast Fourier transform[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 32(9): 120902.  
张志会, 王华英, 刘佐强, 等. 基于快速傅里叶变换的相位解包裹算法[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 32(9): 120902.

栏目编辑: 何卓铭