

数字全息显微镜中采用非线性查找表的相位快速展开

李 勇^{1,2,3} 毛 磊¹ 章海军² 马利红³ 王 辉³

(¹浙江宁波永新光学股份有限公司, 浙江 宁波 315040; ²浙江大学光电信息工程学系, 浙江 杭州 310017)
³浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004

摘要 提出了一种用于数字全息显微术的可靠度导向快速相位展开算法。对可靠度参数进行非线性量化, 结合查找表实现数字全息再现像的相位可靠快速展开。在截断相位图中找出残差点, 以残差点的物光强度最大值为阈值, 将测量区域分为可信区域和非可信区域。将可信区域的可靠度设为最大, 非可信区域的光强进行量化, 作为其可靠度。这样制作了一张非线性质量图。利用该质量图, 结合查表洪水算法进行相位展开。实验中, 采用非线性查找表的相位展开算法比传统洪水算法快 68 倍以上, 比枝切法快近 3 倍。结果表明, 该算法在保持高质量相位展开的情况下大大提高了速度。

关键词 全息; 显微测量; 相位展开; 洪水算法; 查找表

中图分类号 O438.1; TN911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0209025

Fast Phase Unwrapping Based on Nonlinear Look-up Table in Digital Holographic Microscopy

Li Yong^{1,2,3} Mao Lei¹ Zhang Haijun² Ma Lihong³ Wang Hui³

¹Ningbo Yongxin Optics Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315040, China

²Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310017, China

³Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

Abstract A fast reliability-guided phase unwrapping algorithm for digital holography is proposed. The value of reliability is nonlinearly quantized to form a quality map. The phase is unwrapped reliably and fast by combining the nonlinear quality map with look-up table operation. The residues are searched in the wrapped phase map, and the maximum intensity of residues is set as threshold. The measured region is segmented to the reliable region and the doubtful region by the threshold. A nonlinear quality map is derived by setting the reliability of reliable region to maximum and setting those of the doubtful region to quantized value of intensity. Flood-fill algorithm using look-up table is implemented with the nonlinear quality map to unwrap the phase map. In experiments, the speed of proposed algorithm is about 68 times faster than that of conventional flood-fill algorithm and about 3 times faster than that of branch cut algorithm. The experimental results demonstrate that the speed of proposed algorithm is significantly increased and the quality of unwrapped phase is good as well.

Key words holography; microscopic measurement; phase unwrapping; flood-fill algorithm; look-up table

OCIS codes 090.1995; 100.5088; 100.5070; 180.6900

1 引 言

数字全息术在生物医学^[1-4]、材料科学^[5]、机电系统^[6-8]及纳米技术等方面有广泛的应用前景, 其中最有潜力的应用领域是显微测量。利用数字全息显微技术^[9-10]能够从全息图携带的物光波振幅

和相位信息中定量地分析物体的三维信息, 如反射物体的形貌、透射物体的折射率分布等。尤其在生物样品显微测量方面, 数字全息显微术更具独特的优势。其无需对样品进行标记、染色、固定等处理, 可实现无损、无侵入、全场测量。利用数字全息显微

收稿日期: 2013-10-29; 收到修改稿日期: 2013-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(61205012)、浙江省自然科学基金(LQ12F05002)

作者简介: 李 勇(1972-), 男, 博士, 教授, 主要从事数字全息、光学三维传感及显示等方面的研究。

E-mail: liyong@zjnu.cn

镜可以实现纵向亚波长量级的测量精度。数字全息中主要是通过再现像的相位来进行三维(3D)分析的。而根据相位求解原理,得到的相位分布在 $(-\pi, \pi]$ 区间上,这样就限制了测量范围,要求测量点与参考点的光程差小于1个波长。虽然双波长测量方案^[11]可以扩展数字全息的测量范围,并得到了实际应用,但存在系统结构复杂、测量精度低等问题,而且实际中其测量范围的扩展是有限度的。要得到大的测量范围和高精度,一种方法是对测得的相位进行展开。如何获得可靠的相位展开结果,在不少应用中是具有挑战性的问题。数字全息术中的相位展开问题仍是研究的热点之一。

到目前为止,研究者提出了不少相位展开算法,如 Goldstein 枝切法(GA)^[12-13]、可靠度导向算法^[14-16]、Flynn 算法^[17]、区域生长算法^[18]、快速傅里叶变换/离散余弦变换(FFT/DCT)算法^[19]、最小二乘估计算法^[20-21]等。其中可靠度导向算法是较为适合数字全息显微技术的算法。经典的可靠度导向算法[也称为洪水算法(FFA)]^[14-16]运行速度较慢,其中的排序算法是最耗时的部分。研究者提出了一些方法来提高洪水算法的速度,如采用建立可信度树的方法减少排序时间,但因为需要较多的时间建立最小展开树,总体速度提高不多。Anand 等^[22]提出了一种快速洪水算法,该算法采用阈值填充方法,逐步提高洪水填充的阈值,这样去除了缓慢的排序过程,提高了相位展开速度。李勇等^[23]提出了采用查找表的快速洪水算法,通过建立一张动态线性查找表代替排序过程,大大提高了相位展开速度。实际上,相位展开的质量与可靠度查找表有密切的关系,不同的应用展开质量有所差异。建立合适的可靠度表,可以实现最佳的相位展开质量,降低对存储器的需求,提高速度。为此,本文提出采用非线性查找表的数字全息相位快速展开方法。在高可靠度区采用较少的量化级别,而在低可靠度区采用较多的量化级别,在不增加存储器需求的情况下提高低可靠度区的相位展开质量,同时展开速度快。并给出了算法的原理及数字全息显微实验结果。

2 原 理

2.1 数字全息显微镜原理

图1为透射型数字全息显微镜原理示意图。图中NF为中性灰滤光片,BS为分光棱镜,BE为带空间滤波的扩束器,L为准直透镜,M为反射镜,MO为显微物镜。激光器发出的激光经过分光棱镜后分

别进行扩束、准直做为照明光及参考光。照明光透过被测样品后,波前被样品的光学特性调制,成为物光。其经过显微物镜的放大,最后在图像传感器 CCD 表面上与参考光相干叠加形成全息图,由 CCD 将全息图采集到计算机中进行数字处理,得到像面上的物光相位及强度。根据相位及强度信息进一步分析被测物体的光学厚度分布、透射率等信息。

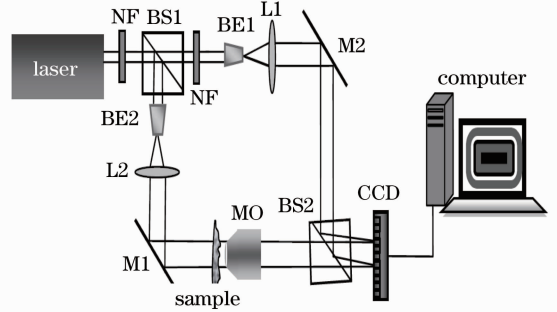


图1 透射型数字全息显微系统结构示意图
Fig.1 Schematic of transmission digital holographic microscope system

设全息面上物光为 $O(x_H, y_H)$, 参考光为 $R(x_H, y_H)$, 则全息图可表示为

$$I(x_H, y_H) = |R(x_H, y_H) + O(x_H, y_H)|^2 = |R(x_H, y_H)|^2 + |O(x_H, y_H)|^2 + R^*(x_H, y_H)O(x_H, y_H) + R(x_H, y_H)O^*(x_H, y_H). \quad (1)$$

在满足再现像分离条件下,对全息图进行频域滤波消除零级及共轭像,得到

$$U_c(x_H, y_H) = R^*(x_H, y_H)O(x_H, y_H). \quad (2)$$

则再现时用参考光 R 照明,全息面处的物光波为

$$U(x_H, y_H) = R(x_H, y_H)U_c(x_H, y_H) = R(x_H, y_H)R^*(x_H, y_H)O(x_H, y_H). \quad (3)$$

像面上的物光可以通过对全息面上的物光进行衍射得到。对于像面全息,(3)式就是测量所需的物光 $U(x_i, y_i)$ 。则物光强度与相位可表示为

$$I(x_i, y_i) = |U(x_i, y_i)|^2, \quad (4)$$

$$\varphi(x_i, y_i) = \arctan \left[\frac{\text{Im} U(x_i, y_i)}{\text{Re} U(x_i, y_i)} \right], \quad (5)$$

式中 $\text{Im}(\cdot)$ 和 $\text{Re}(\cdot)$ 表示取复数的虚部和实部。由反正切函数性质可知,相位值 $\varphi(x_i, y_i)$ 取值在 $(-\pi, \pi]$ 区间上,需要进行相位展开才能得到连续的相位。

2.2 基于查表的洪水算法

查表法基本思路是:首先将可靠度数据进行量化;然后根据量化级别建立一个列表,列表中表项的序号对应于量化级,表项内容为指向一个链表的指

针,该链表为具有同一量化级别的像素图像坐标集合。相位展开就在这个查找表中进行。查找表结构如图 2 所示,图中 B 、 C 、 D 、 \dots 、 G 表示图像坐标, \max 为指向列表中未展开的可靠度最高的表项指针。相位展开过程是:1) 取起始点的四邻域坐标送入对应的链表,并调整 \max 的值,使其指向可靠度最高的表项;2) 展开 \max 所指链表第一个元素,并将其四邻域中未入过链表的像素坐标送入对应的链表,并调整 \max 的值;3) 重复步骤 2) 直到查找表中的数据全部展开。

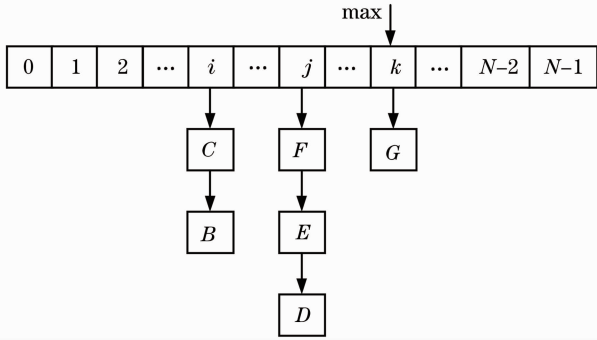


图 2 查找表结构示意图

Fig. 2 Sketch map of look-up table

2.3 非线性查表

对可靠度数据采用不同的量化方式,直接影响了相位展开的路径及结果。例如可靠度只有 0、1 两级时,查表洪水算法就退化为菱形算法(DA),其展开速度最快。但当相位场存在问题时,展开相位的可靠性也最差。在数字全息显微,尤其在生物医学方面的应用中,通常被测物光相位场比较光滑,物光的强度是比较合适的可靠度衡量指标,而且通过优化系统结构参数^[24],可以最大程度地消除散斑等噪声^[25],得到高信噪比的数字全息图。求解的截断相位场在物光强度低的地方存在残差点(极点),为此,这里设计了非线性查找表。首先在截断相位场中检测残差点,并将其可靠度设为 0。残差点检测如下,对于 4 个相邻的像素计算:

$$s(i, j) = \text{INT} \left[\frac{\varphi(i, j+1) - \varphi(i, j)}{2\pi} \right] + \text{INT} \left[\frac{\varphi(i, j) - \varphi(i+1, j)}{2\pi} \right] + \text{INT} \left[\frac{\varphi(i+1, j) - \varphi(i+1, j+1)}{2\pi} \right] + \text{INT} \left[\frac{\varphi(i+1, j+1) - \varphi(i, j+1)}{2\pi} \right], (6)$$

式中 $\text{INT}[\cdot]$ 表示对最接近的整数取整。当(6)式取值为 ± 1 时,通常将 4 个像素中左上角的像素标

为残差点。

然后,设置物光强阈值。由于残差点存在于物光强低的区域,这里将残差点中最大的物光强选为阈值。将再现像中光强大于阈值的像素(可信区域)的可靠度设置为最大。最后将光强介于 0 和阈值之间的物光强(具有这些光强的区域称为非可信区域)进行量化(实验中量化为 256 级),作为该点相位展开的可靠度。这样就完成了非线性可靠度图的制作。基于该非线性可靠度图,采用查表洪水算法进行相位展开,在内存中建立的查找表是一张非线性查找表。物光强高于阈值部分像素经常大块、连片聚集。这样,在这些区域查表法就退化为菱形展开算法。对于可靠度介于 0 和最大值之间的区域,采用所提方法可增加该区域的量化级别,提高可靠度的分辨率,同时提高相位展开的可靠度。

3 实验及结果分析

采用图 3 所示装置,以常见的实验样品如洋葱表皮细胞、草履虫、血红细胞及自制透明光栅等拍摄数字显微全息图进行实验验证。图中光源为 532 nm 波长的半导体抽运固体激光器;图像传感器为 1024 pixel \times 768 pixel 的 CCD,像素尺寸为 3.45 $\mu\text{m} \times$ 3.45 μm 。实验中,选择了其中 512 pixel \times 512 pixel 的区域以达到 35 frame/s 的成像速度。以中性灰滤光片调节参物比。分别对健康人的血红细胞及自制的高度正弦形分布的透明光栅进行实验。从展开速度、质量等方面与现有典型的基于路径的相位展开算法进行了比较。

首先以血红细胞进行实验。采用商用倍率为 60 \times 、数值孔径(NA)为 0.85 的显微物镜进行显微放大,放大倍数设计为 60 倍。图 4 为血红细胞全息成像的结果,图 4(a)为数字全息图,(b)为再现的物

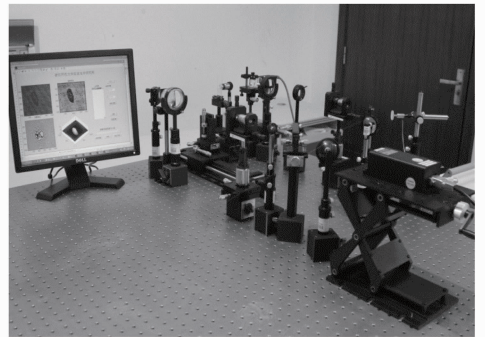


图 3 透射式数字全息显微实验系统

Fig. 3 Experimental setup for transmission digital holographic microscopy

光强度图,(c)为截断相位图,(d)为处理后的非线性可靠度(质量)图。从图 4(b)和(c)可以看出,截断相位中残差点主要分布在强度低的位置。图 5 为所提方法与典型算法的相位展开结果比较情况。图 5(a)~(d)分别为采用菱形算法、Goldstein 算法、传统的洪水算法及所提算法的相位展开结果,采用减

参考全息图相位的方法^[26]去除了载波及二次相位。可以看出,菱形算法由于没有差错控制机制,展开的相位中有明显的错误。展开相位中出现的拉线现象是由于相位展开中经过了错误的路径。其他三种算法取得了良好的结果,相位展开质量没有明显的差别。图 5(e)为采用所提方法展开相位的三维表示。

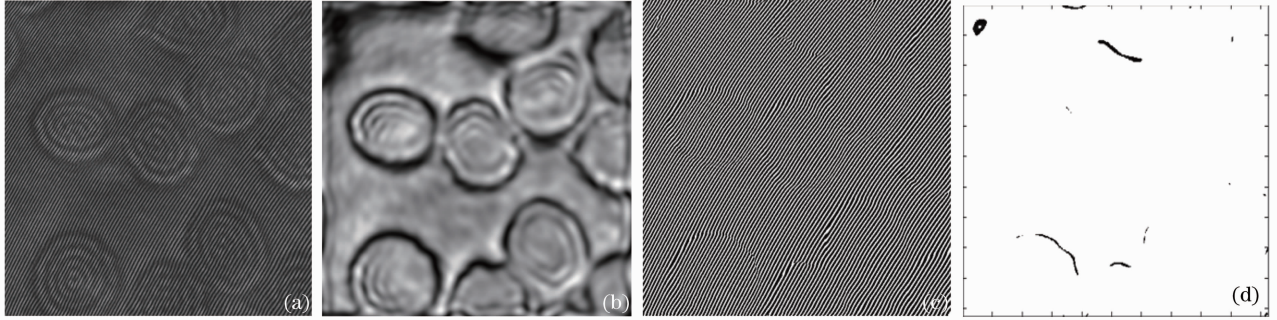


图 4 红细胞成像结果。(a)数字全息图;(b)强度图;(c)截断相位图;(d)非线性质量图

Fig. 4 Imaging results of red blood cells. (a) Digital hologram; (b) reconstructed intensity; (c) wrapped phase; (d) nonlinear quality map

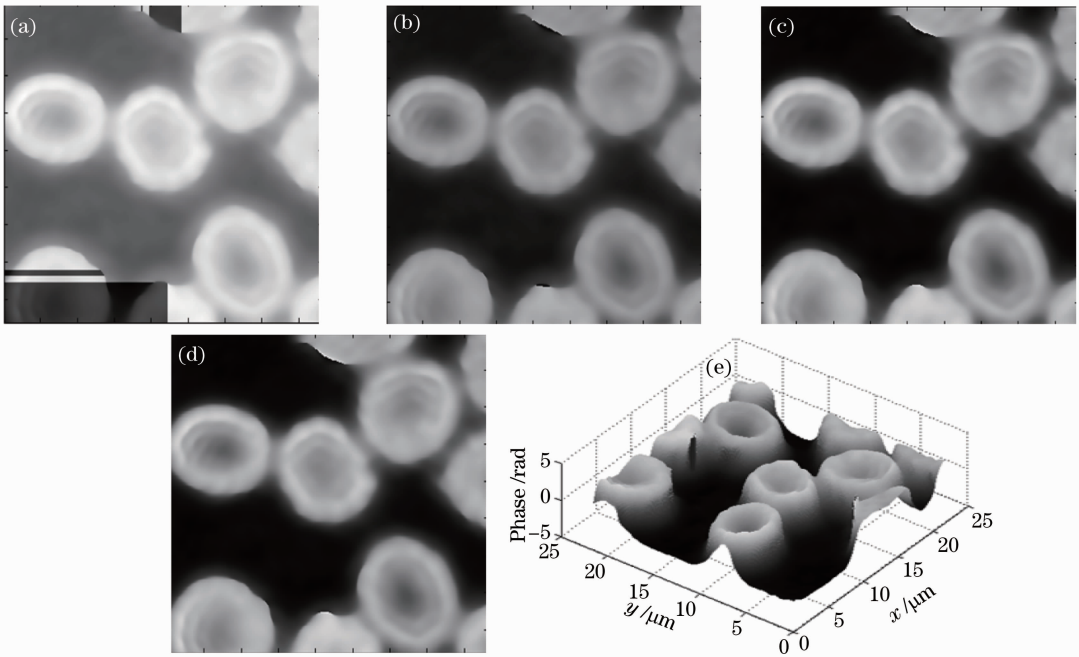


图 5 红细胞相位展开结果比较。(a)采用菱形算法;(b)采用 Goldstein 算法;(c)采用传统的洪水算法;(d)采用本文算法;(e)展开相位三维图

Fig. 5 Comparison of unwrapping results of red blood cells with different algorithms. (a) With DA; (b) with GA; (c) with conventional FFA; (d) with proposed method; (e) 3D map of unwrapped image

然后采用自制的透明光栅进行实验。显微镜物镜倍率为 20×,NA 为 0.25,设计放大倍数为 20 倍。图 6 为成像结果,其中(a)为数字全息图,(b)为截断相位。

图 7 为不同算法的展开结果比较。图 7(a)~(d)分别为采用菱形算法、Goldstein 算法、传统的洪水算法及所提算法的相位展开结果。图 7(e)为采

用所提方法展开相位的三维表示。可以得出与红细胞实验相同的结论。

最后,比较了各算法的相位展开速度。处理图像的尺寸为 512 pixel×512 pixel,计算机的配置为:CPU Intel(R) core E7300,内存 3.0 GB,操作系统 Windows XP。每种算法运行 30 次取平均,作为其

运行时间。表 1 为不同算法的运行时间比较,从表中可以看出,采用非线性查找表的相位展开速度仅

次于菱形算法,远高于传统的洪水算法,比 Goldstein 算法快近 3 倍。

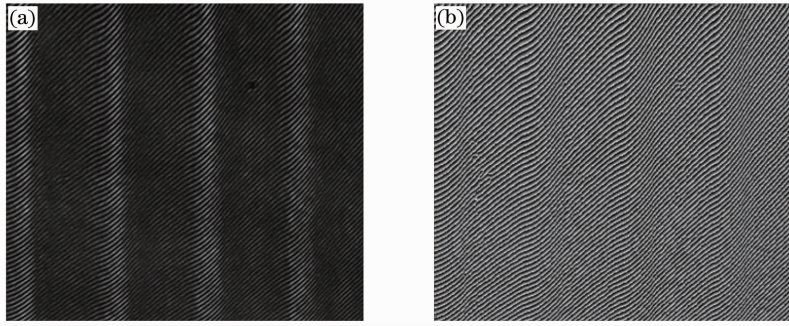


图 6 透明光栅成像结果。(a)数字全息图;(b)截断相位

Fig. 6 Imaging results of transparent grating. (a) Digital hologram; (b) wrapped phase

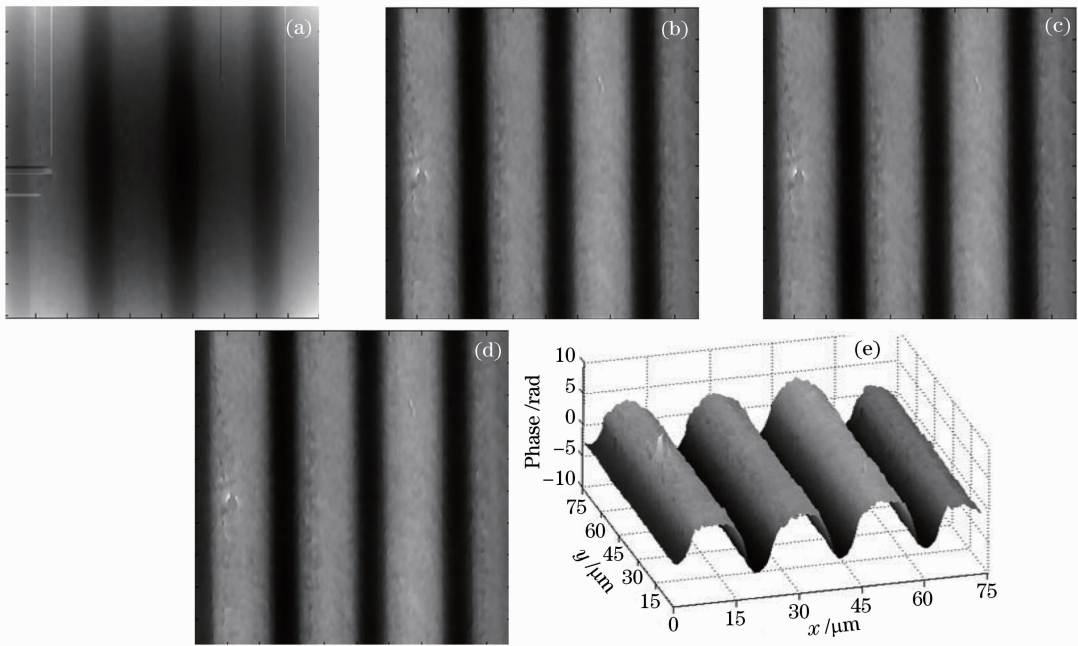


图 7 透明光栅相位展开结果比较。(a)采用菱形算法;(b)采用 Goldstein 算法;(c)采用传统的洪水算法;
(d)采用所提算法;(e)展开相位三维图

Fig. 7 Comparison of unwrapping results of transparent grating with different algorithms. (a) With DA; (b) with GA;
(c) with conventional FFA; (d) with proposed method; (e) 3D map of unwrapped image

表 1 不同算法的相位展开速度比较(单位: ms)

Table 1 Comparison of phase unwrapping time for different algorithms (unit: ms)

Algorithm	Data	Red blood cells	Transparent grating
	Diamond algorithm		17.7
Goldstein's branch cut algorithm		170.3	166.8
Conventional flood-fill algorithm		2996.7	4688.5
Proposed algorithm		43.2	44.7

从实验结果可以看出,采用非线性查找表的洪水算法完全适用于实时数字全息显微镜技术。它在展开质量与已有成熟算法无明显差异的情况下,大大提

高了相位展开的速度,实现了相位的可靠快速展开。同时,为验证算法的普遍适用性,利用该算法对条纹投影三维测量结果及合成孔径雷达干涉法得到的相位图进行了实验,也得到了类似的结果。

4 结 论

相位展开是数字显微中的关键技术之一,它直接影响了测量的精度及速度。尽管目前已有不少成熟的相位展开算法适用于不同的应用,寻找适用于数字全息显微的快速、可靠算法仍是研究的焦点。本文提出了一种采用非线性查找表的洪水算法。利用非线

性可靠度量方法提高非可信区域的可靠度分辨率,提高了连片可信区域的相位展开速度,实现了快速、可靠的相位展开。

参 考 文 献

- 1 Ma Lihong, Wang Hui, Jin Hongzhen, *et al.*. Experimental study on quantitative phase imaging by digital holographic microscopy[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0309002.
马利红,王 辉,金洪震,等. 数字全息显微镜定量相位成像的实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0309002.
- 2 M H Jericho, H J Kreuzer, M Kanka, *et al.*. Quantitative phase and refractive index measurements with point-source digital in-line holographic microscopy[J]. Appl Opt, 2012, 51(10): 1503-1515.
- 3 Zhao Jie, Wang Dayong, Li Yan, *et al.*. Experimental study on the quantitative phase-contrast imaging of the biological samples by digital holographic microscopy[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2906-2911.
赵 洁,王大勇,李 艳,等. 数字全息显微术应用于生物样品相衬成像的实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2906-2911.
- 4 P Langehanenberg, L Ivanova, I Bernhardt. Automated three-dimensional tracking of living cells by digital holographic microscopy[J]. J Biomed Opt, 2009, 14(1): 014018.
- 5 Su Linglong, Ma Lihong, Wang Hui, *et al.*. Three-dimensional refractive index quantitative measurement for optical fiber by digital holographic tomography[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1008002.
苏玲珑,马利红,王 辉,等. 基于数字全息显微断层成像的光纤折射率三维定量测量[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1008002.
- 6 León-Rodríguez, R Rodríguez-Vera, J A Rayas, *et al.*. High topographical accuracy by optical shot noise reduction in digital holographic microscopy[J]. J Opt Soc Am A, 2012, 29(4): 498-506.
- 7 T Kozacki, M Józwick, K Liżewski. High-numerical-aperture microlens shape measurement with digital holographic microscopy[J]. Opt Lett, 2011, 36(22): 4419-4421.
- 8 W J Qu, C O Choo, Y J Yu, *et al.*. Microlens characterization by digital holographic microscopy with physical spherical phase compensation[J]. Appl Opt, 2010, 49(33): 6448-6454.
- 9 E Cuche, F Bevilacqua, C Depeursinge. Digital holography for quantitative phase-contrast imaging[J]. Opt Lett, 1999, 24(5): 291-293.
- 10 L H Ma, H Wang, Y Li, *et al.*. Partition calculation for zero-order and conjugate image removal in digital in-line holography[J]. Opt Express, 2012, 20(2): 1805-1815.
- 11 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.
- 12 R M Goldstein, H A Zebker, C L Werner. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping[J]. Radio Science, 1988, 23(4): 713-720.
- 13 Y G Lu, X Z Wang, G T He. Phase unwrapping based on branch cut placing and reliability ordering[J]. Opt Eng, 2005, 44(5): 055601.
- 14 X Su, W Chen. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review[J]. Opt & Lasers in Eng, 2004, 42(3): 245-261.
- 15 S Fang, L Meng, L J Wang, *et al.*. Quality-guided phase unwrapping algorithm based on reliability evaluation[J]. Appl Opt, 2011, 50(28): 5446-5452.
- 16 S Liu, W Xiao, F Pan, *et al.*. Complex-amplitude-based phase unwrapping method for digital holographic microscopy[J]. Opt & Lasers in Eng, 2012, 50(3): 322-327.
- 17 T J Flynn. Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity[J]. J Opt Soc Am A, 1997, 14(10): 2692-2701.
- 18 W Xu. A region growing algorithm for InSAR phase unwrapping[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1999, 37(1): 124-134.
- 19 M A Schofield, Y M Zhu. Fast phase unwrapping algorithm for interferometric applications[J]. Opt Lett, 2003, 28(14): 1194-1196.
- 20 J Arines. Least-squares modal estimation of wrapped phases: application to phase unwrapping[J]. Appl Opt, 2003, 42(17): 3373-3378.
- 21 D Kerr, G H Kaufmann, G E Galizzi. Unwrapping of interferometric phase-fringe maps by the discrete cosine transform[J]. Appl Opt, 1996, 35(5): 810-816.
- 22 A Anand, W S Zhou. Fast phase-unwrapping algorithm based on a gray-scale mask and flood fill[J]. Appl Opt, 1998, 37(23): 5416-5420.
- 23 Li Yong, Su Xianyu. Fast algorithm for reliability-guided phase unwrapping[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(11): 76-79.
李 勇,苏显渝. 用于可靠性导向相位展开的快速算法[J]. 光电工程, 2005, 32(11): 76-79.
- 24 Ma Lihong, Wang Hui, Li Yong, *et al.*. Effect of system parameters on the reconstructed image quality in digital holographic microscopy[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(2): 300-307.
马利红,王 辉,李 勇,等. 数字全息显微系统结构参量对再现像质的影响[J]. 光子学报, 2011, 40(2): 300-307.
- 25 Cai Xiaou, Ni Xiaojing. Study on reduction of speckle noise in reconstructed image of digital hologram[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 050901.
蔡晓鸥,倪小静. 数字全息再现像散斑噪声消除的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 050901.
- 26 P Ferraro, S De Nicola, A Finizio, *et al.*. Compensation of the inherent wave front curvature in digital holographic coherent microscopy for quantitative phase-contrast imaging[J]. Appl Opt, 2003, 42(11): 1938-1946.

栏目编辑: 何卓铭