

数字全息中的自动相位畸变补偿算法

高超¹, 文永富^{1,2*}, 程灏波^{1,2**}, 王英伟²

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;

²北京理工大学深圳研究院, 广东 深圳 518057

摘要 提出一种面向数字全息的相位畸变自动补偿方法, 利用图像分割技术对被检测物体进行自动分割, 生成相位掩模板, 进而得到不含被测物体区域的畸变相位。基于相位畸变校正模型对畸变相位进行最小二乘拟合, 最终实现相位畸变的自动补偿。实验中搭建了数字全息检测平台, 并对晶圆表面进行测量, 结果表明所提出的方法能够实现畸变相位的自动校正。

关键词 全息; 畸变校正; 图像分割; 三维测量

中图分类号 TN26

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1209001

Automatic Phase-Distortion Compensation Algorithm in Digital Holography

Gao Chao¹, Wen Yongfu^{1,2*}, Cheng Haobo^{1,2**}, Wang Yingwei²

¹School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Shenzhen Research Institute, Beijing Institute of Technology, Shenzhen, Guangdong 518057, China

Abstract A method for the automatic phase-distortion compensation in digital holography is proposed, in which the image segmentation technique is used to automatically segment the detected objects, thus a phase mask is generated, and the phase-distortion in areas without containing the detected object region is further obtained. The least-squares fitting of phase-distortion based on the phase-distortion correction model is done and the automatic phase-distortion compensation is eventually achieved. In experiments, a built-in digital holographic inspection platform is established and the wafer surface measurement is conducted. The results show that the proposed method can be used to automatically correct phase-distortion.

Key words holography; phase-distortion correction; image segmentation; three-dimensional measurement

OCIS codes 090.1995; 350.5030; 120.5050

1 引 言

数字全息技术采用 CCD 记录全息图, 具有三维、动态、非干预的特点, 广泛应用于微机电系统表面测量、粒子场测量、微光学测试和生物细胞等领域^[1-7]。光学透镜存在固有像差^[8]和测量时无法避免的调整误差^[9]等缺点, 使得再现相位存在二次甚至高次相位畸变。为了获取物体准确的相位信息, 需要对再现像相位进行畸变校正^[10]。Di 等^[8]提出一种处理薄相位物体的相位畸变补偿方法, 采用少于原始全息图矩阵采样点数的最小二乘曲面拟合方法校正单个全息图的波前曲率。Wang 等^[11]提出一

种基于改进的数学模型的表面拟合方法, 通过将交叉项和高阶项加入数学模型中提高算法精度, 并采用非迭代法提高计算速度。Zuo 等^[12]提出一种基于主成分分析的自动畸变校正方法, 无需手动提取相位, 该方法处理速度快。但是, 上述方法都存在一个假设前提: 只有当被检测物体区域较小且相位值相对系统畸变来说可以忽略才能得到准确的相位信息^[13], 而对于被检测物体区域较大且相位值相对系统畸变来说不可忽略时, 上述方法在处理畸变时就会出现欠校正情况。对此, Colomb 等^[14]在实验中通过手动选取除被检测物体之外的空白区域进行曲线曲面拟合, 实现畸变校正。Wen 等^[9]提出了一种

收稿日期: 2018-04-20; 修回日期: 2018-07-18; 录用日期: 2018-08-15

基金项目: 深圳市科技创新基金(JCYJ20170817114512319, JCYJ20170817114558026)、北京市自然科学基金(4184097)

* E-mail: wyf2015@bit.edu.cn; ** E-mail: chenghaobo@tsinghua.org.cn

改进的相位畸变数学模型,并对数值重构相位进行了畸变校正,但该方法依旧需要手动提取检测对象,不利于实现自动校正。

针对以上校正方法中存在的不足,本文提出一种基于图像分割的数字全息相位畸变自动校正方法,将水平集图像分割算法应用到数字全息相位畸变校正中,自动提取检测对象后再进行畸变校正。实验搭建了反射式数字全息实验平台,对刻有箭头图案的晶圆表面进行了实验研究,结果验证了所提出的相位畸变自动校正方法的可行性及有效性。

2 基本原理

2.1 数字全息的相位畸变模型

点全息记录原理如图 1 所示,假设点光源产生的参考光 R 和物光 O 在物平面上的坐标分别为 (x_r, y_r, z_r) 和 (x_o, y_o, z_o) , z_r 和 z_o 分别为参考光 R 和物光 O 到全息平面对应位置的距离,设 A_o 和 $\varphi_{\text{object}}(x, y)$ 分别为被测物体的振幅和相位,两光波在全息平面发生干涉时,全息平面上的干涉强度 $I(x, y)$ 可表示为^[15]

$$I(x, y) = 1 + A_o^2 + A_o \exp[j\varphi_{\text{object}}(x, y)] \exp\left\{ \frac{jk}{2} \left(\frac{1}{z_o} - \frac{1}{z_r} \right) (x^2 + y^2) - jk \left(\frac{x_o - x_r}{z_o} \right) x - jk \left(\frac{y_o - y_r}{z_o} \right) y + \left[\frac{jk}{2z_o} (x_o^2 + y_o^2) - \frac{jk}{2z_r} (x_r^2 + y_r^2) \right] \right\} + A_o \exp[-j\varphi_{\text{object}}(x, y)] \exp\left\{ -\frac{jk}{2} \left(\frac{1}{z_o} - \frac{1}{z_r} \right) (x^2 + y^2) + jk \left(\frac{x_o - x_r}{z_o} \right) x + jk \left(\frac{y_o - y_r}{z_o} \right) y + \left[-\frac{jk}{2z_o} (x_o^2 + y_o^2) + \frac{jk}{2z_r} (x_r^2 + y_r^2) \right] \right\}. \quad (1)$$

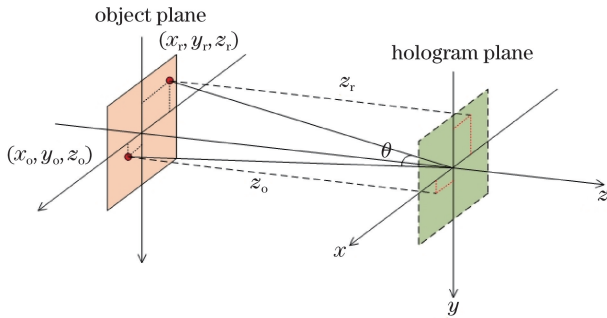


图 1 点全息图记录原理

Fig. 1 Recording principle of point hologram

当 $z_o \neq z_r$ 时,原始像部分的相位分别受 x 和 y 两个方向上的倾斜误差、二次项误差和一个常数项的调制,存在相位畸变;当 $z_o = z_r$ 时,相位误差为零,相位畸变被消除。而在实际调试过程中,要精确调整到 $z_o = z_r$,操作难度大,会存在一定的调整误差。因此,采用角谱法^[9]对全息图进行重构得到的强度 $I(x, y)$ 和相位 $\phi^I(n\Delta x_I, m\Delta y_I)$ 分别可表示为

$$\begin{cases} I(x, y) = |\phi^I(n\Delta x_I, m\Delta y_I)|^2 \\ \phi^I(n\Delta x_I, m\Delta y_I) = \arctan \frac{\text{Im}[\phi^I(n\Delta x_I, m\Delta y_I)]}{\text{Re}[\phi^I(n\Delta x_I, m\Delta y_I)]} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\phi^I(n\Delta x_I, m\Delta y_I)$ 为物体的光波场分布。(2)式中的相位 $\phi^I(n\Delta x_I, m\Delta y_I)$ 处于被包裹的状态,需

要用相位解包裹算法得到重构相位 $\Phi_{\text{rec}}(x, y)$ 。基于已有的相位畸变校正模型^[9],得到全息图的重构相位 $\Phi_{\text{rec}}(x, y)$ 可表示为

$$\Phi_{\text{rec}}(x, y) = \varphi_{\text{object}}(x, y) + \varphi_{\text{error}}(x, y), \quad (3)$$

式中 $\varphi_{\text{object}}(x, y)$ 为被检测的理想相位, $\varphi_{\text{error}}(x, y)$ 为畸变相位。

2.2 基于水平集的图像分割原理

基于水平集的图像分割算法最早由 Osher^[15-20]于 1988 年提出,在图像分割过程中,水平集函数自动处理曲线和曲面拓扑结构的变化,并且始终为简单函数,其基本思想是将 N 维曲面的演化转化为 $N+1$ 维水平集函数演化的隐函数来求解^[21]。水平集演化方程可表示为^[16]

$$\frac{\partial I}{\partial t} + F |\nabla I| = 0, \quad (4)$$

式中 F 为速度函数, ∇I 为全息图重构得到的相位图像 I 的梯度。用水平集方法对图像 I 进行分割的过程本质上是对偏微分方程的求解过程。假设 $I_{ij}^n = I(ih, jh, n\Delta t)$, 其中 h 为离散空间中的间隔, Δt 为方程演化的时间步长, (i, j) 为离散空间中的某一点, F_{ij}^n 表示 n 时刻速度函数在 (i, j) 处的值, $\nabla_{ij} I_{ij}$ 为图像 I 在 (i, j) 处的梯度,则水平集演化方程的离散化形式可表示为^[22]

$$\frac{I_{ij}^{n+1} - I_{ij}^n}{\Delta t} = F_{ij}^n |\nabla_{ij} I_{ij}|. \quad (5)$$

采用有限差分法对(5)式进行求解,并把一阶与其前后差分算子 I_x^0 、 I_x^- 、 I_x^+ 和前后梯度算子 ∇^- 、 ∇^+ 代入(5)式,得到^[22]

$$I_{ij}^{n+1} = I^n + \Delta t [\max(F_{ij}^n, 0) \nabla^+ + \min(F_{ij}^n, 0) \nabla^-] = I^n + \Delta t [\max(V_{0ij}, 0) \nabla^+ + \min(V_{0ij}, 0) \nabla^- + \max(u_{ij}^n, 0) I_x^- + \min(u_{ij}^n, 0) I_x^+ + \max(v_{ij}^n, 0) I_y^- + \min(v_{ij}^n, 0) I_y^+ - \epsilon k_{ij}^n ((I_x^0)^2 + (I_x^-)^2)^{\frac{1}{2}}], \quad (6)$$

式中 V_{0ij} 为速度函数 F 的常量演化速度, $-\epsilon k_{ij}^n$ 为速率演化速度, u 和 v 分别为 x 和 y 方向的水平对流速度。

基于水平集原理的图像分割方法正是通过对(6)式的迭代计算来更新水平集函数,从而实现图像的自动分割处理。

为了实现畸变校正算法的自动化,将水平集图像分割方法应用到畸变校正算法中,对强度图进行水平集图像自动分割,将分割后得到的物体进行二值化处理得到算法所需的相位掩模板,再对相位掩模板和含有畸变的相位图进行拟合处理,得到畸变校正后的相位图,从而实现畸变校正的自动化处理。

为了验证水平集图像分割方法的有效性,对两个不同形状的物体分别进行了水平集图像分割和二值化处理,结果如图 2 所示。

2.3 自动校正算法原理

所提出的相位畸变自动补偿算法的具体流程如图 3 所示。首先利用角谱法对全息图进行重构,得

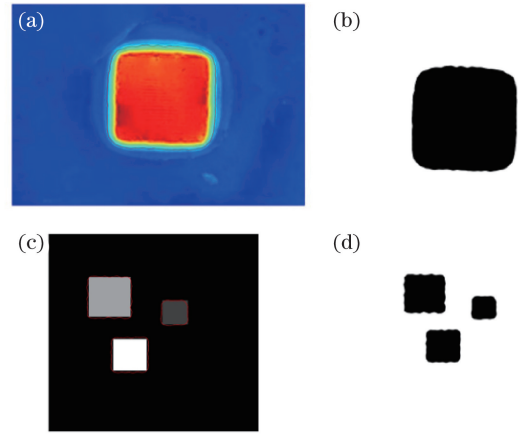


图 2 水平集分割结果。(a)实测的方形物体被分割后的图像;(b)图 2(a)的二值化图像;(c)模拟的矩形物体被分割后的图像;(d)图 2(c)的二值化图像

Fig. 2 Level set segmentation results. (a) Measured square object image after segmentation; (b) binary image of Fig. 2(a); (c) simulated rectangular object image after segmentation; (d) binary image of Fig. 2(c)

到物体的强度图 I 和含有畸变的相位图 Φ_{rec} ;然后基于水平集图像分割算法对强度图 I 进行图像分割与二值化处理,得到相位掩模板 AE_mask ;利用相位掩模板对含有畸变的相位图 Φ_{rec} 进行掩模处理,得到不含被检测物体的相位畸变图 U ;随后对相位图 U 进行最小二乘拟合处理,得到拟合畸变相位图 $\varphi_{\text{error}}(x, y)$ 。具体拟合过程如下:畸变相位 $\varphi_{\text{error}}(x, y) = a(x^2 + y^2) + bx + cy + d$, 其中 a 、 b 、 c 、 d 均为二次表达式的系数。采用最小二乘法来求解这些系数^[9],求解方程为

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum (x_i^2 + y_i^2)^2 & \sum x_i(x_i^2 + y_i^2) & \sum y_i(x_i^2 + y_i^2) & \sum (x_i^2 + y_i^2) \\ \sum x_i(x_i^2 + y_i^2) & \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum y_i(x_i^2 + y_i^2) & \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum (x_i^2 + y_i^2) & \sum x_i & \sum y_i & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum (x_i^2 + y_i^2) \Phi_{\text{rec}} \\ \sum x_i \Phi_{\text{rec}} \\ \sum y_i \Phi_{\text{rec}} \\ \sum \Phi_{\text{rec}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

对(3)式进行变形可得 $\varphi_{\text{object}}(x, y) = \Phi_{\text{rec}}(x, y) - \varphi_{\text{error}}(x, y)$, 从而得到被检测的图像经畸变校正后的理想相位图 φ_{object} 。

3 实验结果及讨论

3.1 实验装置介绍

本次实验所需的实验装置如图 4 所示,系统中使用的 CCD 采用德国 Imagingsource 板级相机 DMM 31AUC03-ML,像素尺寸为 $4.65 \mu\text{m}$,像素数目为 1024×768 。激光器产生的水平激光束经扩束

准直单元和会聚透镜 L 后,在分光棱镜 BS 内部会聚,形成点光源。点光源发射的光束经过分光棱镜后,一部分光透射到反射镜 $M3$,将这部分光作为参考光,另一部分光被反射到待观测物体表面,携带待测物体信息后作为物光,与参考光在 CCD 平面发生干涉,最终由 CCD 采集得到数字全息图。

3.2 基于水平集图像分割的相位畸变补偿实验结果

为了验证所提出算法的可行性,利用图 4 所示光路搭建实验平台,并对刻蚀箭头的晶圆(该样品为 μmasch 公司提供的高精度标准样品,型号为

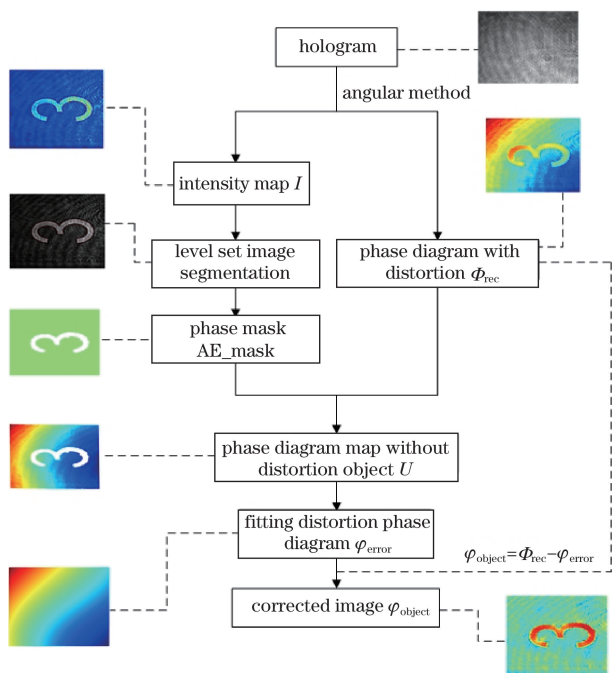


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of algorithm

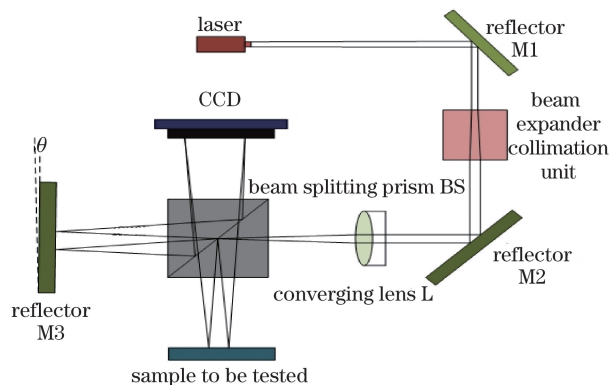


图 4 实验系统原理示意图

Fig. 4 Schematic of experimental system

TGXZY02,样品上的台阶高度为 100 nm,精度为 3%) 表面进行测量,将该样本的数字全息图保存于计算机中。按照图 3 算法流程图的步骤,首先利用角谱法对图 5(a)中的全息图进行重构,得到图 5(b)所示的强度图和图 5(c)所示的含有畸变的相位图。为了更清楚地展示所提算法的畸变校正效果,选择图 5(c)中第 200 行的相位值进行作图,结果如图 5(d)所示。

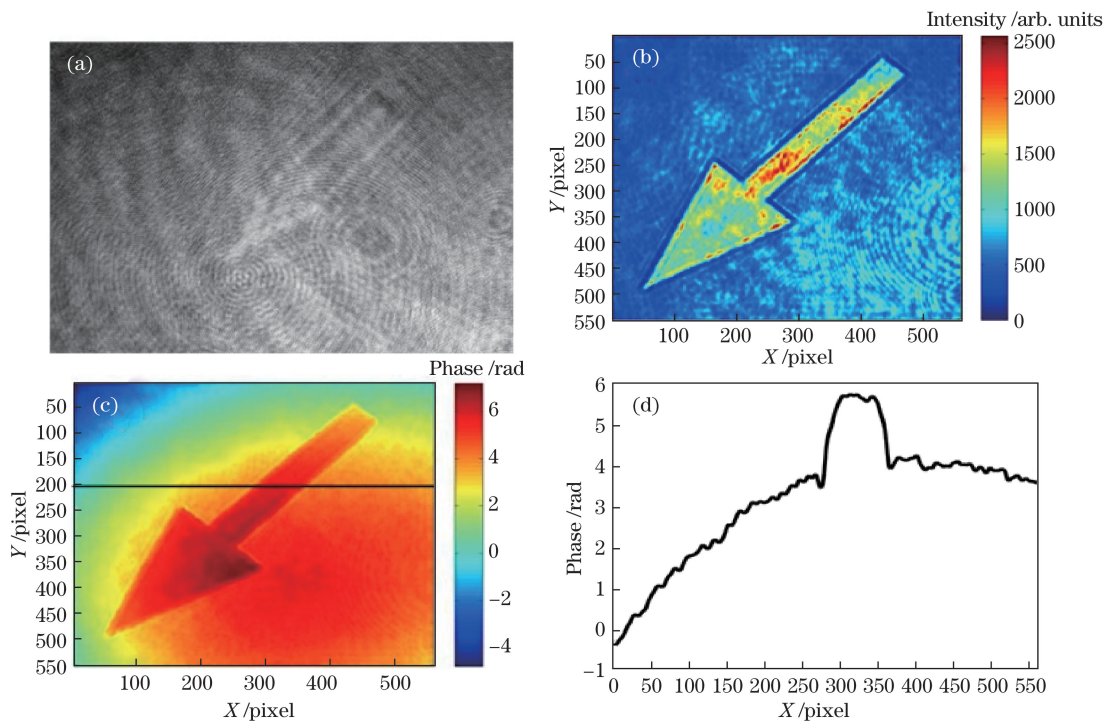


图 5 (a)全息图; (b)再现像强度图; (c)含有畸变的相位图; (d)含有畸变的相位图第 200 行的相位值

Fig. 5 (a) Hologram; (b) intensity map of reconstructed image; (c) phase map with distortion;

(d) phase value in the 200th row of phase map with distortion

利用水平集函数[(6)式]对图 5(b)中的强度图进行图像分割,分割效果如图 6(a)所示,红色分割曲线明显将被检测物体包围;对图 6(a)进行二值化处理,去掉图像中的被检测物体,得到的相位掩模板如图 6(b)示;对相位掩模板进行最小二乘拟合处

理,得到图 6(c)所示的不含被检测物体的相位畸变图;将图 5(c)中的含有畸变的相位与图 6(c)中不含被检测物体的畸变相位相减,得到拟合相位畸变图,如图 6(d)所示;最后对该拟合畸变相位进行畸变校正,校正效果如图 7(a)所示。

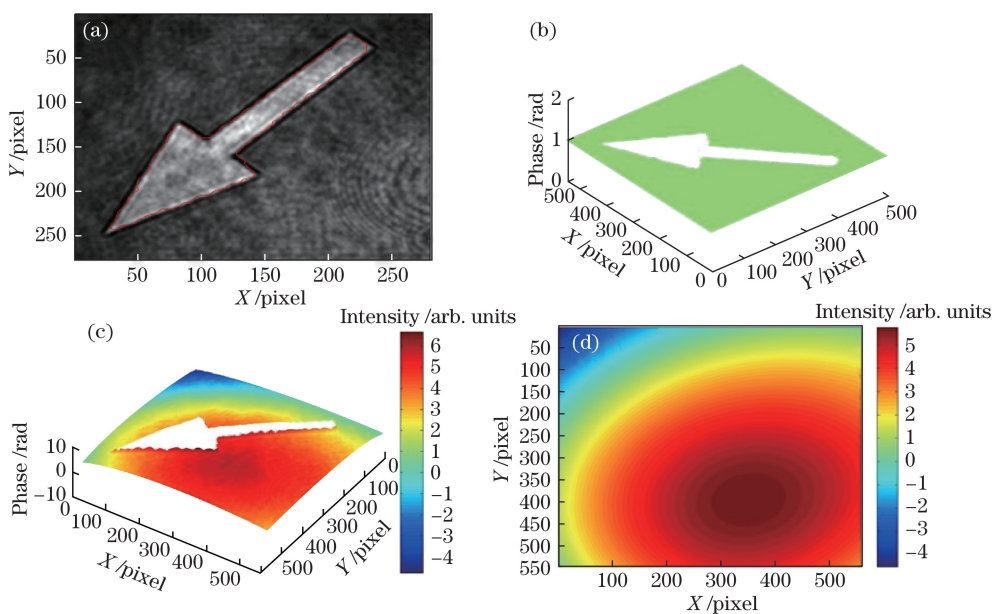


图 6 (a)水平集分割效果图; (b)相位掩模板图; (c)不含检测物体的相位畸变图; (d)拟合相位畸变图
 Fig. 6 (a) Effect diagram of level set segmentation; (b) phase mask map; (c) phase distortion map without detected object; (d) fitted phase distortion map

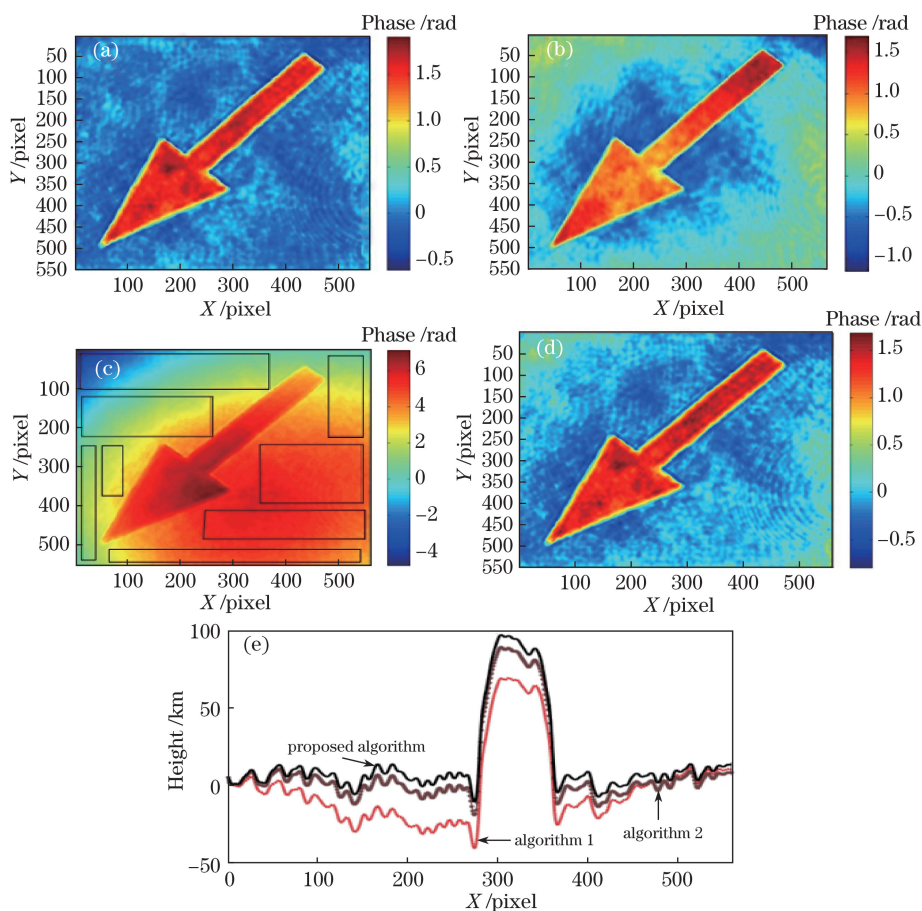


图 7 (a)所提算法的校正效果图; (b)算法 1 的校正效果图; (c)算法 2 中手动选取的畸变区域; (d)算法 2 的校正效果图; (e)经三种算法校正后的第 200 行相位的高度值
 Fig. 7 (a) Correction effect by proposed algorithm; (b) correction effect by algorithm 1; (c) distortion region selected by hand in algorithm 2; (d) correction effect by algorithm 2; (e) phase height in the 200th row after correction by three algorithms

为了验证所提算法的校正效果优于前文所提到的其他算法,实验中对比了两个较典型的畸变校正算法:文献[9]所提出的畸变校正算法1和文献[14]所提出的畸变校正算法2。首先,根据文献[9]所提出的算法1,采用最小二乘拟合对图5(c)中含有畸变的相位图中所有的相位信息进行畸变校正,校正效果如图7(b)所示。然后,根据文献[14]中所提出的算法2,选择图5(c)中除检测物体之外的畸变区域进行校正,为提高校正精确度,所选择的畸变区域应尽可能多地覆盖除检测物体之外的全部畸变区域。实验中选择了8个畸变区域,分别用黑

色方框标注,如图7(c)所示,并对这8个区域的相位值进行畸变校正,校正效果如图7(d)所示。最后,为与标准样品的高度值进行对比,分别将图7(a)、(b)、(d)根据 $\varphi=4\pi z/\lambda$ 计算出高度值 z ,并取第200行进行作图比较,结果如图7(e)所示。表1给出了三种算法校正后第200行相位的标准差和高度。由于算法1和算法2存在不同程度的畸变误差,所以采用分段计算标准差。实验结果表明:用所提出的畸变校正算法校正后的高度值更接近理论标准值,所提算法的相对误差较小,校正效果更好。

表1 三种算法校正后第200行相位高度的标准差和高度值

Table 1 Standard deviation and height value of phase in the 200th row after correction by three algorithms

Algorithm type	Standard deviation of each interval in row 200			Height / nm	Relative error / %
	0-274	275-367	368-561		
Algorithm 1	0.22	0.58	0.19	69.20	30.80
Algorithm 2	0.12	0.58	0.12	89.03	10.97
Proposed algorithm	0.09	0.58	0.10	97.20	2.80

4 结 论

针对检测对象体积大且相位值相对系统畸变不可忽略的情况,提出一种基于图像分割的数字全息相位畸变自适应补偿算法。该算法基于水平集函数原理的图像分割,自动提取图像中的被检测物体,再对不含被检测物体的图像相位进行畸变校正。实验中,将所提算法与直接拟合畸变校正算法和手动选取畸变区域的校正算法进行对比,发现所提出的基于图像分割的畸变校正方法校正效果更好,充分验证了该畸变校正方法的可行性与有效性。

参 考 文 献

- [1] Di J L, Zhao J L, Fan Q, *et al.* Phase correction of wavefront reconstruction in digital holographic microscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(1): 56-61.
邸江磊, 赵建林, 范琦, 等. 数字全息显微术中重建物场波前的相位校正[J]. *光学学报*, 2008, 28(1): 56-61.
- [2] Kebbel V, Adams M, Hartmann H J, *et al.* Digital holography as a versatile optical diagnostic method for microgravity experiments[J]. *Measurement Science and Technology*, 1999, 10(10): 893-899.
- [3] Xu L, Peng X Y, Miao J M, *et al.* Studies of digital microscopic holography with applications to microstructure testing [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(28): 5046-5051.
- [4] Seebacher S, Osten W, Jueptner W P O. Measuring shape and deformation of small objects using digital holography[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3479: 104-115.
- [5] Kebbel V, Jueptner W P O. Application of digital holographic microscopy for inspection of micro-optical components[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4398: 189-198.
- [6] Liu Y F, Zhang W B, Xu T X, *et al.* Study on in-line incoherent digital holographic microscopy in reflection configuration[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1109002.
刘亚飞, 张文斌, 许天旭, 等. 反射式同轴非相干数字全息显微成像系统研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1109002.
- [7] Deng L J, Huang X Y, Zeng L M, *et al.* Dual-wavelength image-plane digital holographic microscopy based on bi-color LED chips[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0111004.
邓丽军, 黄星艳, 曾吕明, 等. 基于双色LED芯片的双波长像面数字全息显微术[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0111004.
- [8] Di J, Zhao J, Sun W, *et al.* Phase aberration compensation of digital holographic microscopy based on least squares surface fitting[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(19): 3873-3877.
- [9] Wen Y F, Qu W J, Cheng C, *et al.* Phase errors elimination in compact digital holoscope (CDH) based on a reasonable mathematical model[C]. *Proceedings of*

- SPIE, 2015, 9302: 930207.
- [10] Cuhe E, Marquet P, Depeursinge C. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms[J]. Applied Optics, 1999, 38(34): 6994-7001.
- [11] Zhang Y Z, Wang D Y, Wang Y X, *et al.* Automatic compensation of total phase aberrations in digital holographic biological imaging [J]. Chinese Physics Letters, 2011, 28(11): 114209.
- [12] Zuo C, Chen Q, Qu W J, *et al.* Phase aberration compensation in digital holographic microscopy based on principal component analysis[J]. Optics Letters, 2013, 38(10): 1724-1726.
- [13] Liu Y, Jiao M X, Xing J H, *et al.* Automatic compensation of phase distortion based on Zernike surface fitting in digital holographic microscopy[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(2): 193-198.
刘芸, 焦明星, 邢俊红, 等. 数字全息显微术中 Zernike 表面拟合的相位畸变自动补偿[J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(2): 193-198.
- [14] Colomb T, Montfort F, Kühn J, *et al.* Numerical parametric lens for shifting, magnification, and complete aberration compensation in digital holographic microscopy[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2006, 23(12): 3177-3190.
- [15] Osher S, Sethian J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations[J]. Journal of Computational Physics, 1988, 79(1): 12-49.
- [16] Li C M, Xu C Y, Gui C F, *et al.* Level set evolution without re-initialization: a new variational formulation[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005: 8588904.
- [17] Chan T F, Vese L A. Active contours without edges[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(2): 266-277.
- [18] Caselles V, Catté F, Coll T, *et al.* A geometric model for active contours in image processing [J]. Numerische Mathematik, 1993, 66(1): 1-31.
- [19] Malladi R, Sethian J A, Vemuri B C. Shape modeling with front propagation: a level set approach[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(2): 158-175.
- [20] Li C M, Xu C Y, Gui C F, *et al.* Distance regularized level set evolution and its application to image segmentation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(12): 3243-3254.
- [21] Li J C. FFT computation of angular spectrum diffraction formula and its application in wavefront reconstruction of digital holography[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1163-1167.
李俊昌. 角谱衍射公式的快速傅里叶变换计算及在数字全息波面重建中的应用[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1163-1167.
- [22] Li H. Variational level set method for multi-phase image segmentation[D]. Qingdao: Qingdao University, 2008: 9-10.
李华. 多相图像图像分割的变分水平集方法[D]. 青岛: 青岛大学, 2008: 9-10.