

基于统计分析方法的同步移相干涉图位置配准

田 枫 白福忠 吴亚琴 徐永祥 梅秀庄

(内蒙古工业大学机械学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要 使用同步移相干涉仪重建波前相位时,需要对移相干涉图进行准确的位置配准和目标区域确定以保证重建精度和相位解缠绕算法的成功实施。提出一种基于统计分析方法的圆形域同步移相干涉图位置配准技术,对一组包含不同相位分布的干涉图按照对应像素位置进行方差分布函数计算;利用最大组间方差法完成阈值分割,从而分离出干涉图像的背景与目标区域,通过梯度运算检测出目标区域的轮廓;利用改进 Hough 变换算法估计出各个轮廓的绝对位置和半径参数。数值仿真结果表明,当轮廓半径大于 64 pixel 时,该方法的配准精度可以达到 0.5 pixel。通过建立自参考同步移相干涉仪对该方法的可靠性与实用性进行实验验证。

关键词 物理光学;同步移相干涉仪;圆形域干涉图;位置配准;统计分析方法

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0626001

Position Registration for Simultaneous Phase-Shifting Interferograms Based on Statistical Analysis Method

Tian Feng Bai Fuzhong Wu Yaqin Xu Yongxiang Mei Xiuzhuang

(College of Mechanical engineering, Inner Mongolia University of Technology,
Huhhot, Inner Mongolia 010051, China)

Abstract In the wavefront phase reconstruction with simultaneous phase-shifting interferometers, accurate position registration and determination of object region for phase-shifting interferograms are needed to be done so that the reconstructed accuracy and the successful implement of phase unwrapping algorithm can be assured. A position registration technology based on statistical analysis method is presented to do with the circular simultaneous phase-shifting interferograms. According to all corresponding pixel positions, a variance distribution function is calculated from a group of interference patterns including different phase distributions. By using the maximal interclass variance method, the threshold segmentations are implemented, and so the background and object regions of interferograms can be separated effectively. Furthermore, the edges of object regions are detected by applying gradient operation. With the improved Hough transform algorithm, absolute positions and radius parameters of each edge are estimated. With numerical simulation, the match precision of this method under the radius of greater than 64 pixel can be achieved up to 0.5 pixel. In addition, a self-referencing simultaneous phase-shifting interferometer is built to validate the reliability and practicability of the proposed method experimentally.

Key words physical optics; simultaneous phase-shifting interferometer; circular interferogram; position registration; statistical analysis method

OCIS codes 260.3160; 120.3180; 120.5050; 120.2650

1 引 言

同步移相干涉仪通过采集同一时刻不同空间位

置处具有一定相位差的多幅干涉图,利用移相算法重建测量结果,并进一步对重建结果进行相位解缠

收稿日期: 2013-12-09; **收到修改稿日期:** 2014-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(61108038)、教育部“春晖计划”科研项目(Z2011069)、内蒙古自然科学基金(2011BW0701)

作者简介: 田 枫(1988—),女,硕士研究生,主要从事波前探测和光学系统设计等方面的研究。

E-mail: tawnytian@163.com

导师简介: 白福忠(1979—),男,博士,副教授,主要从事光电测试技术方面的研究。E-mail: fzbaiim@163.com
(通信联系人)

绕以获得待测波前相位^[1-6]。各种同步移相干涉仪具有共同的特点:多幅移相干涉图在同一时刻、不同空间位置获得,并由一个或多个 CCD 传感器同步采集。由此导致了一个共性问题:同一 CCD 传感器不同空间位置,或者不同 CCD 传感器所采集到的干涉图之间需要进行准确的位置配准,以保证移相算法的相位重建精度^[6]。左芬^[7]对干涉图位置配准问题进行分析,并指出干涉图位置配准误差相当于移相干涉仪中的相移误差,直接影响波前重建精度,但其未给出有效的解决措施。此外,干涉图目标区域的确定也是极其重要的预处理步骤之一,会直接影响到相位解缠绕的成功实施^[8],并对提高解缠绕结果的精度和解缠绕算法运算速度都具有重要影响^[9];同时,其他干涉波前测量技术中也同样会面临干涉图目标区域确定的问题。

移相干涉图之间存在相移,并且近场衍射造成干涉图边界处条纹对比度较差,因而不能使用数字图像处理技术中的图像配准或图像分割来实现移相干涉图位置配准与目标区域确定。在同步移相干涉仪波前测量实验中,一种确定移相干涉图的相对位置的方法是在光路中放入标志点,但它无法准确得到每幅干涉图的确切位置及目标区域大小,从而会造成不同干涉图之间配准结果的不一致,配准结果重复性较差^[10]。另一种方法是通过计算每一幅移相干涉图目标区域的重心来确定干涉图之间的相对位置,因而它的应用效果取决于多幅干涉图目标区域的确定精度,目前利用干涉条纹对比度这一判据来分离出干涉图的背景与目标区域的方法可靠性较差。通常这几种技术均需要进一步通过人工选定有效区域来减小目标区域的确定误差^[7,10]。因此,本文提出一种操作简捷、结果准确的圆形域同步移相干涉图位置配准方法,该方法基于方差分析、阈值分割和改进 Hough 变换的统计分析方法,能够同时确定出每一幅干涉图的位置参数及有效区域。通过数值仿真对方法精度进行了分析,同时建立了自参考同步移相干涉仪对所提方法进行实验验证,并给出相应的实验结果。

2 方法原理

同步移相干涉仪一般可同步采集到 4 幅相移为 $\pi/2$ 的干涉图,这样根据四步移相算法^[11]计算出缠绕波前相位为

$$\varphi_w(x, y) = \arctan \frac{I_{3\pi/2}(x, y) - I_{\pi/2}(x, y)}{I_0(x, y) - I_\pi(x, y)}, \quad (1)$$

式中 I 为干涉图强度,其下标 $0, \pi, \pi/2, \pi/3$ 为相应相移, (x, y) 为干涉图空间坐标。然后按照一定的相位解缠绕方法复原被测波前相位 $\varphi(x, y)$ 。当应用(1)式计算波前相位时,需要对移相干涉图的空间位置进行有效配准以保证波前相位的重建精度。本文提出一种统计分析方法以确定圆形域移相干涉图的有效区域以及圆形轮廓参数,进而完成干涉图的位置配准,该方法包含三个主要的技术步骤,并且这三个步骤均基于统计分析原理实现。

2.1 方差分布函数计算

在同步移相干涉仪中随机引入 M 个不同的待测波前相位 $\varphi_m(x, y)$, 其中 $m = 1, \dots, M$ 。当入射光的相位分布改变时,相应地,由 CCD 传感器采集所产生的干涉图像,其灰度表示为 $G_m(i, j)$, 这里假设 M 帧图像中的每一帧中均包含 4 幅移相干涉图,即该同步移相干涉仪所产生的 4 幅移相干涉图由一个 CCD 传感器同步采集得到。于是,移相干涉图[例如 $I_0(x, y)$] 的坐标系统 $x-y$ 位于图像坐标系统 $i-j$ 平面。

针对图像中某一像素 (i_0, j_0) , 其在 M 帧图像中对应位置处光强的方差为

$$D(i_0, j_0) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M [G_m(i_0, j_0) - \bar{G}(i_0, j_0)]^2, \quad (2)$$

式中 $\bar{G}(i_0, j_0) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M G_m(i_0, j_0)$ 。当图像中全部像素均进行上述运算后,得到方差分布函数 $D(i, j)$ 。

根据统计学中方差理论,对于干涉图无效数据区域(即背景区域)中的某一像素,它在 M 帧图像之间的灰度值变化极小;相反,对于干涉图有效数据区域(即目标区域)内的某一像素,由于相位分布 $\varphi_m(x, y)$ 的改变,该像素的灰度值在各帧图像之间存在极大的变化。按照随机误差理论,图像帧数 M 应大于 10 帧或更多,以抑制随机噪声的影响。因此,方差分布函数 $D(i, j)$ 可以很好地描述这种起伏变化特征,进一步,可以分离出干涉图像的背景区域与目标区域。

2.2 阈值分割与轮廓检测

由于 $D(i, j)$ 中包含了每一像素在各帧图像之间光强变化大小的信息,且它在目标区域和背景区域中存在较大差异,因而应用以下介绍的最大组间方差法可以对 $D(i, j)$ 进行阈值分割,进而分离出干涉图的目标区域。

将 $D(i, j)$ 中数值大于某一阈值 T 的像素设为

组 1、小于 T 的像素设为组 2。设组 $k(k=1,2)$ 中的像素数为 N_k ，均值为 \bar{D}_k ，全部像素的均值为 \bar{D} ，则组间方差定义为

$$\sigma^2 = \frac{N_1(\bar{D}_1 - \bar{D})^2 + N_2(\bar{D}_2 - \bar{D})^2}{N_1 + N_2}, \quad (3)$$

式中 $\bar{D} = \frac{N_1\bar{D}_1 + N_2\bar{D}_2}{N_1 + N_2}$ ，则(3)式可化为

$$\sigma^2 = \frac{N_1N_2(\bar{D}_1 - \bar{D}_2)^2}{(N_1 + N_2)^2}. \quad (4)$$

采用(4)式计算出的组间方差 σ^2 作为阈值分割的尺度，也就是当该值成为最大时所对应的 T 即为所求的最佳阈值。然后对 $D(i,j)$ 进行如下阈值分割

$$B(i,j) = \begin{cases} 1, & D(i,j) \geq T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (5)$$

式中数值为 1 和 0 的区域分别对应于干涉图的目标区域和背景区域。进一步计算 $B(i,j)$ 的梯度幅值

$$|\nabla B(i,j)| = \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial i}\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial j}\right)^2}, \quad (6)$$

式中

$$\frac{\partial B}{\partial i} = B(i,j) * \mathbf{h}_x, \quad \frac{\partial B}{\partial j} = B(i,j) * \mathbf{h}_y, \quad (7)$$

其中，* 表示二维(2D)卷积， \mathbf{h}_x 与 \mathbf{h}_y 分别是 x 与 y 方向的卷积模板，分别表示为 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ 与

$\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ 。梯度运算输出的轮廓结果为

$$f(i,j) = \begin{cases} 1, & |\nabla B(i,j)| \geq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (8)$$

由此即可检测出干涉图目标区域轮廓，且轮廓线幅宽度为 1 pixel。

2.3 基于改进 Hough 变换的圆形轮廓估计

针对 2.2 节得到的干涉图轮廓，使用 Hough 变换进行圆形轮廓估计以获得圆心坐标与半径参数，从而实现移相干涉图之间的位置配准。

在已知曲线形状的条件下，Hough 变换实际上是利用分散的轮廓点进行曲线逼近，也可看成一种聚类分析技术。图像空间中所有像素均对参数空间中的参数集合进行投票表决，获得多数表决票的参数即为所求的特征参数^[12-13]。平面直角坐标系中圆的方程表示为

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2, \quad (9)$$

式中 (a,b) 为圆心坐标， r 为半径。一般情况下圆经过 Hough 变换后的参数空间是三维(3D)的，计算量较大。下面提出一种改进的 Hough 变换技术可将参数空间的维数由三降到二，从而减少计算量。

直角坐标系中的圆如图 1 所示， θ_n 表示轮廓点 (x_n, y_n) 的梯度方向，且一定是指向圆心的。在 θ_n 已知的条件下，圆心的计算公式表示为

$$a = x_n - r \cos \theta_n, \quad (10a)$$

$$b = y_n - r \sin \theta_n. \quad (10b)$$

对(10a)式整理后可得

$$r = \frac{x_n - a}{\cos \theta_n}. \quad (11)$$

将(11)式代入(10b)式得

$$b = y_n - (x_n - a) \frac{\sin \theta_n}{\cos \theta_n}. \quad (12)$$

于是有

$$b = (a - x_n) \tan \theta_n + y_n. \quad (13)$$

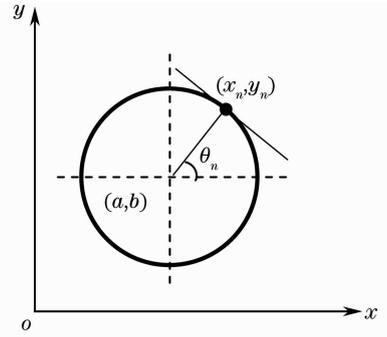


图 1 直角坐标系中的圆

Fig. 1 Circle in Cartesian coordinate

对于某一轮廓点 (x_n, y_n) ，可以利用一阶偏导数来计算该点梯度角的正切值，即 $\tan \theta_n = \frac{\partial f / \partial y_n}{\partial f / \partial x_n}$ ，然后将轮廓点坐标与梯度角正切值代入(13)式即可映射为二维参数空间 $a-b$ 中的一条直线。当所有轮廓点在参数空间中所映射的直线均被描绘出来后，找到经过次数最多的位置即可得到圆心坐标 (a,b) 。将圆心坐标计算结果代入(9)式，计算出所有轮廓点至圆心的距离，出现频率最高的距离值即为半径参数 r 。

当 4 幅移相干涉图的位置和尺寸参数(即圆形轮廓的圆心坐标与半径)被计算出来后，便实现了干涉图的位置配准，同时也确定出了干涉图的目标区域。为了便于使用(1)式重建波前相位，可取 4 个半径数值的均值作为圆形域干涉图的半径参数。

3 方法精度的仿真分析

通过数值仿真对所提方法的配准精度和目标区域确定精度进行分析。随机产生如下 16 帧仿真干涉图：

$$G_m = A(\rho) \cdot \{130 + 120 \cos[2\pi\varphi_m(x,y)]\} + \eta_m(x,y), \quad (14)$$

式中 $m=1, \dots, 16$, 坐标变量 x 与 y 均被限定在 $1 \sim 261$ pixel 的范围内, 也即图像分辨率为 $261 \text{ pixel} \times 261 \text{ pixel}$, 每一像素的灰度被量化到 256 级, 每帧图像中均加入一个零均值、方差为 3 的随机噪声 $\eta_m(x, y)$, 相位分布 $\varphi_m(x, y)$ 用 $d/r_0 = 5$ (其中 d 为入瞳直径, r_0 为 Fried 参数)、包含第 3~25 阶泽尼克模式、按照 Kolmogorov 理论所产生的大气湍流相位屏来模拟, 圆形域干涉图的轮廓由如下光瞳函

数 $A(\rho)$ 决定:

$$A(\rho) = \begin{cases} 1, & \rho = [(x-a)^2 + (y-b)^2]^{1/2} \leq r \\ 0, & \rho > r \end{cases} \quad (15)$$

干涉图目标区域的中心坐标 (a, b) 首先设置为 $(131, 131)$ pixel, 半径 $r=128$ pixel. 由此产生的仿真干涉图如图 2 所示, 图中给出了其中三帧。

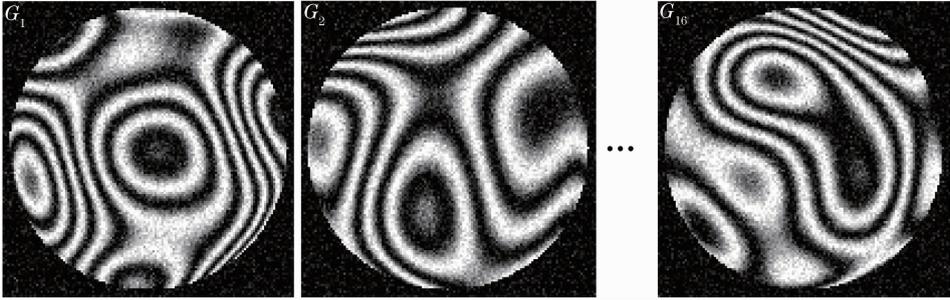


图 2 仿真干涉图

Fig. 2 Simulated interferograms

按照第 2 节所介绍的配准方法对这 16 帧仿真图像进行处理, 得到圆形轮廓的估计结果 (\hat{a}, \hat{b}) 和 \hat{r} . 配准算法中 Hough 变换参数空间的分辨率设置为 0.1 pixel, 位置估计误差用棋盘距离 $E_p = \max(|\hat{a} - a|, |\hat{b} - b|)$ 表示, 半径估计误差为 $E_r = |\hat{r} - r|$.

下面仿真分析当干涉图中心位置在亚像素级别情况下, 干涉图轮廓中心的位置与半径估计误差的关系. 设给定的轮廓半径 $r=128$ pixel, 轮廓中心坐标 $a=131 \text{ pixel} + \delta x, b=131 \text{ pixel}$, 其中 δx 表示中心坐标在 x 轴方向的偏移量, 其步长为 0.1 pixel, 变化范围为 ± 1 pixel. 图 3 显示了不同给定位置情况下配准算法的估计误差, 当轮廓中心位置偏移量为 0, $\pm 0.5, \pm 1$ pixel 时估计结果与给定值完全一致, 而估计误差的最大值(图 3 中为 0.2 pixel)小于

0.5 pixel, 且出现在位置偏移量等于其他更小的分辨率水平上. 在关于干涉波前传感器空间分辨率的研究中发现: 一般地, 一个不低于 $120 \text{ pixel} \times 120 \text{ pixel}$ 的空间分辨率可以获得相对较高的波前重建精度^[14]. 于是, 另外针对 $r \geq 64$ pixel 的各种不同半径尺寸的圆形域干涉图进行仿真分析, 均得出与图 3 相类似的结论. 因此, 本文所提方法可以达到 0.5 pixel 级的配准精度, 同时具有非常好的抗随机噪声能力.

4 方法实验验证

4.1 实验系统与同步移相干涉图采集

建立如图 4 所示的自参考同步移相干涉仪对该方法进行实验验证. 波前相位由液晶空间光调制器(LC-SLM)产生, 自参考同步移相干涉仪由一个马赫-曾德尔型点衍射干涉结构与空间偏振移相系统组成, 点衍射光学系统的艾里斑直径 $d_A = 2.44\lambda f/d \approx 50 \mu\text{m}$, 其中 $f=150 \text{ mm}$ 是透镜 L5 的焦距, $d=4.61 \text{ mm}$, $\lambda=632.8 \text{ nm}$ 是入射激光波长. 实验中, 用于产生点衍射的针孔的直径为 $25 \mu\text{m}$, 该尺寸约等于艾里斑直径一半, 由此可以获得均方根(RMS)误差不高于 $\lambda/100$ 的参考波面^[15-16]. 该同步移相干涉仪利用偏振元件可同步获得 4 幅相移为 $\pi/2$ 的移相干涉图, 并且同时成像于一个 8 位 CCD 传感器光敏面上的不同位置. 有关偏振移相过程的详细描述可以参考文献^[17]. 实验中, 当 LC-SLM 产生不

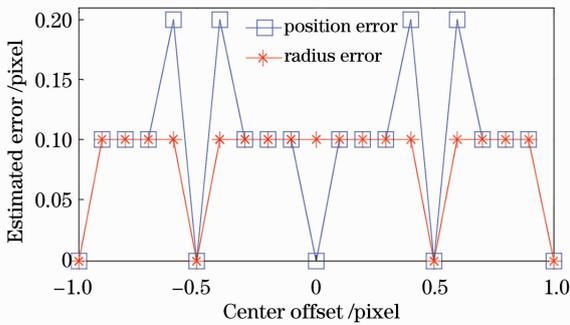


图 3 当 $r=128$ pixel 时配准算法的估计误差

Fig. 3 Estimated error of registration algorithm when $r=128$ pixel

L: lens; SF: spatial filter; P: polarizer; M: mirror; PBS: polarization beam splitter;
BS: non-polarization beam splitter; QW: quarter-wave plate

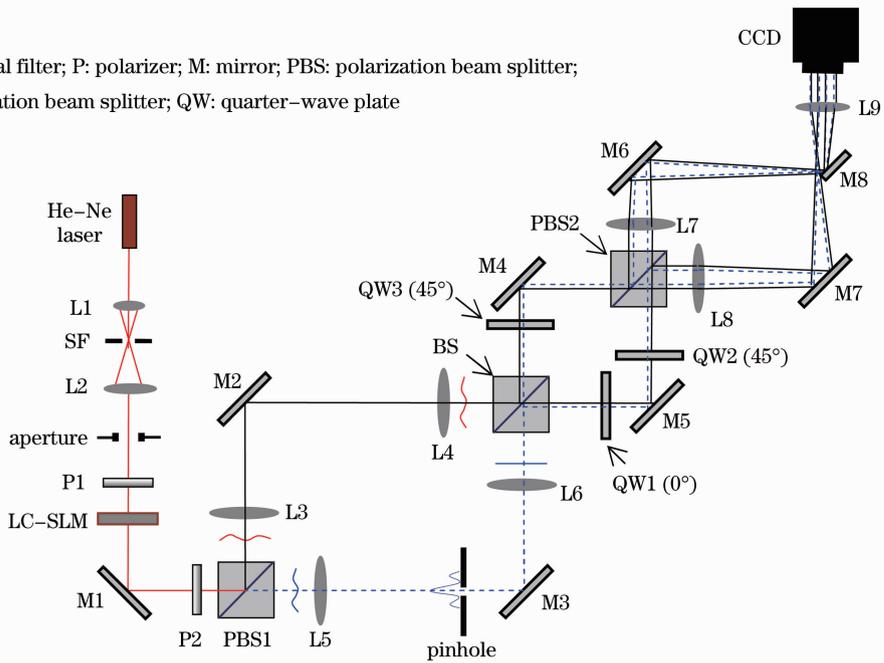


图 4 自参考同步移相干涉仪光学结构

Fig. 4 Optical setup of self-referencing simultaneous phase-shifting interferometer

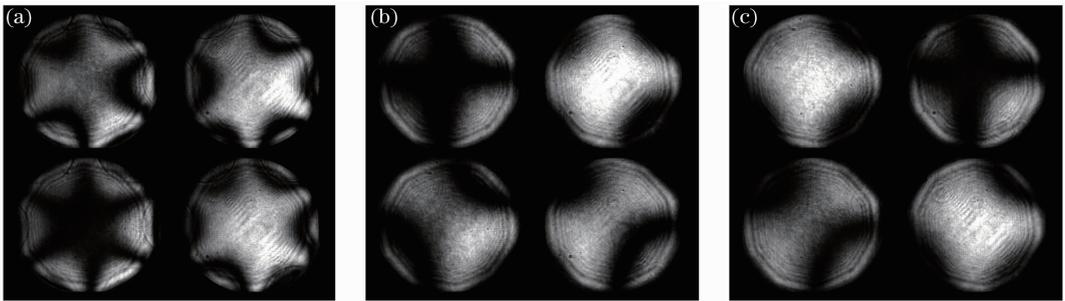


图 5 同步移相干涉图

Fig. 5 Simultaneous phase-shifting interferograms

同的波前相位时共采集了 20 帧干涉图像,其中三帧如图 5 所示,每帧图像大小为 528 pixel×467 pixel。

4.2 移相干涉图轮廓检测与估计

根据(2)式计算实验中采集到的 20 帧移相干涉图的方差分布函数,结果如图 6 所示。由图 6 可知,方差数值较小的区域对应于干涉图的背景区域,而

目标区域中的方差数值一般较大,这一特征同样由图 7 所示的方差数值的概率分布曲线所具有明显的双峰特性得以证实。采用最大组间方差法计算出的阈值 T 等于 11,该数值恰好对应于图 7 所示曲线中双峰之间的谷底位置。利用(5)式与所求阈值对方差分布函数进行阈值分割,结果如图 8 所示。

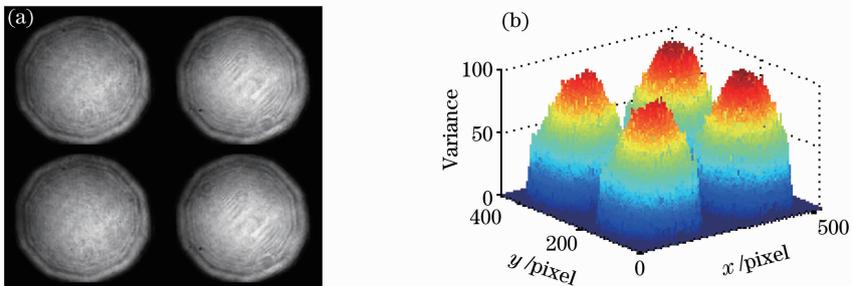


图 6 方差分布图。(a)二维;(b)三维

Fig. 6 Variance distribution images. (a) 2D; (b) 3D

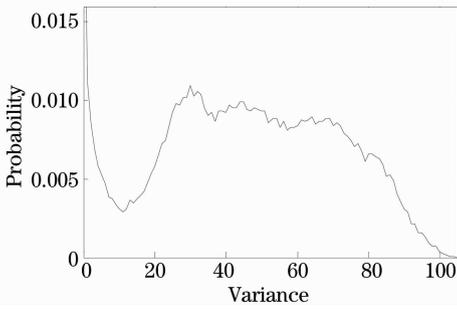


图 7 方差数值的概率分布

Fig. 7 Probability distribution of variance value

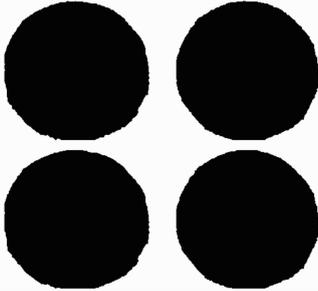


图 8 阈值分割结果

Fig. 8 Threshold segmentation result

实验中为了消除目标区域外离散噪声干扰,便于对各幅移相干涉图轮廓分别应用 Hough 变换进行圆形轮廓估计,这里采用八邻域标记算法对阈值分割结果进行连通区域标记,并保留其中面积最大的 4 个区域,结果如图 9 所示。

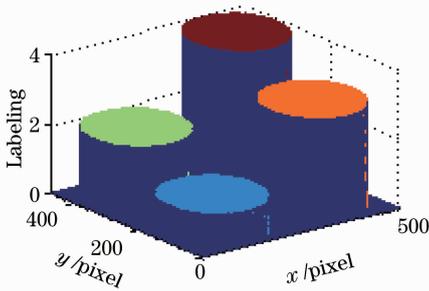


图 9 连通区域标记

Fig. 9 Connected component labeling

通过梯度运算检测出干涉图目标区域的轮廓,并进一步利用改进 Hough 变换算法对轮廓图像进行圆参数估计,轮廓检测与估计结果如图 10 所示,图中实线与点划线分别表示检测结果和估计结果。4 个轮廓 $a \sim d$ 的圆心坐标分别为 $(131, 121), (131, 355), (398, 120.5), (398, 354.5)$ pixel, 半径分别为 $112.5, 112.5, 112, 112$ pixel, 半径的平均值取为 112 pixel。

4.3 波前相位重建实验

将 4.2 节中的实验配准结果应用于图 5(a)所

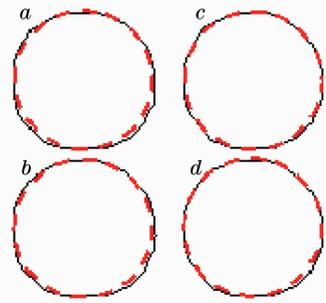


图 10 干涉图轮廓检测与估计结果

Fig. 10 Edge detection and estimated result for interferograms

示的移相干涉图,结果如图 11 中白色点画线圆形所示,从而完成了 4 幅移相干涉图的位置配准和目标区域确定,然后根据(1)式可以重建波前相位。

为了评价该方法的有效性,同时使用一种传统配准方法(即放入标志点与人工模板相结合的方法)^[10]对图 5(a)所示干涉图像进行位置配准和区域确定,然后进行波前相位重建。最后,使用 Zygo 干涉仪对待测波前相位进行测量,并计算了两种方法的重建相位与 Zygo 干涉仪测量结果之间的残余相位误差,结果如图 12 所示,图 12(d)、(e)所示残余相位误差的 RMS 值分别等于 0.057λ 和 0.072λ 。

因为自参考同步移相干涉仪中针孔滤波造成参考光强度下降且分布不均匀^[18],所以产生的干涉条纹将拥有不一致的条纹对比度,且干涉图轮廓位置处的条纹对比度更低[这可以由图 6(b)看出],相应地增加了位置配准与目标区域确定的难度。在此情况下,本文方法仍可以有效估计出移相干涉图的位置参数,并且 4 个圆形域轮廓的半径估计结果具有极高的一致性。上述的波前重建结果也很好地验证了本文所提方法得到的配准结果具有更高的配准精度,实验过程也显示了本文方法所具有的操作简便性,不需要人工参与的情况下便可完成干涉图位置配准与目标区域确定,且多次配准结果重复性很好。

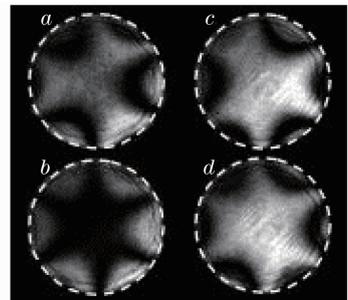


图 11 干涉图位置配准结果

Fig. 11 Position registration result for interferograms

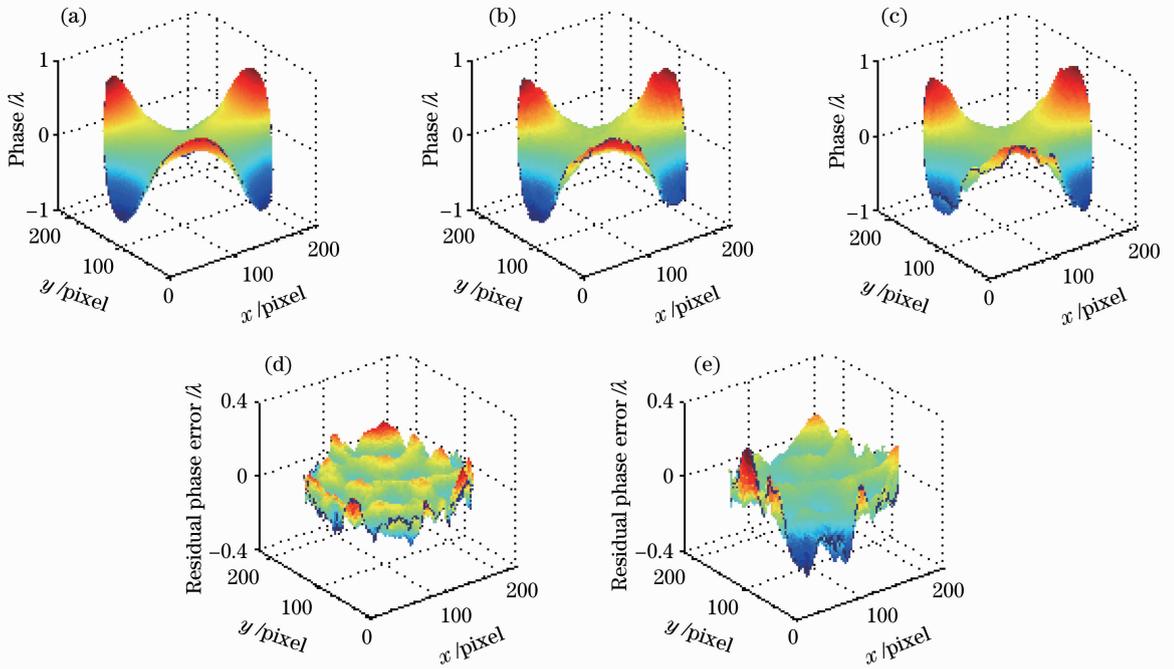


图 12 相位重建实验的波前相位。(a) Zygo 干涉仪测量结果；(b), (c) 使用本文方法和传统方法进行位置配准后的重建相位；(d), (e) 对应于图(b)和(c)的残余相位误差

Fig. 12 Experimental results of phase reconstruction. (a) Wavefront phase measured by Zygo's interferometer; (b), (c) reconstructed phases after position registration with proposed method and conventional method; (d), (e) residual phase errors corresponding to Fig. (b) and (c)

5 结 论

提出了一种统计分析方法对圆形域同步移相干涉图进行位置配准,主要包括方差分布函数计算、基于最大组间方差的阈值分割和改进的 Hough 变换圆形轮廓估计。该方法同样可应用于其他干涉波前相位复原技术(如时间移相干涉仪和基于傅里叶变换法的载波干涉条纹测量技术)中来确定圆形域干涉图的目标区域。数值仿真结果显示,当圆形域轮廓半径大于 64 pixel 时,该方法可以达到 0.5 pixel 级的配准精度,因而可以有效地保证波前重建精度与相位解缠绕算法的成功实施。实验过程与实验结果显示,该统计分析方法与现有干涉图位置配准方法相比,无需在光路中放置标志点、计算过程中无需人工参与,因而具有很好的便捷性与实用性;同时,该方法配准结果准确可靠,多次配准结果重复性好,因而与“重心法”相比,具有非常好的抗噪声干扰能力,将能够应用于各类同步移相干涉仪中实现准确的干涉图位置配准。

参 考 文 献

1 O Y Kwon. Multichannel phase-shifted interferometer [J]. Opt Lett, 1984, 9(2): 59-61.

2 R Smythe, R Moore. Instantaneous phase measuring interferometry [J]. Optical Engineering, 1984, 23(4): 361-364.

3 Qian Kemao, Miao Hong, Wu Xiaoping. A real-time polarization phase shifting technique for dynamic measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(1): 64-67.

钱克矛, 缪 泓, 伍小平. 一种用于动态过程测量的实时偏振相移方法[J]. 光学学报, 2001, 21(1): 64-67.

4 Zuo Fen, Chen Lei, Xu Chunsheng. Simultaneous phase-shifting interferometry based on two-dimension grating [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(4): 663-667.

左 芬, 陈 磊, 徐春生. 基于二维光栅分光的同步移相干涉测量技术[J]. 光学学报, 2007, 27(4): 663-667.

5 Liang-chia Chen, Sheng-lih Yeh, Abraham Mario Tapilouw, *et al.*. 3-D surface profilometry using simultaneous phase-shifting interferometry [J]. Opt Commun, 2010, 283(18): 3376-3382.

6 Bo Li, Lei Chen, Bing Zhao, *et al.*. Spatial mismatch calibration using circular carrier technique in the simultaneous phase shifting interferometry [J]. Appl Opt, 2012, 51(8): 1037-1044.

7 Zuo Fen. Study on the Simultaneous Phase-Shifting Anti-Vibration Technology Interferometry [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008. 47-50.

左 芬. 同步移相干涉测量的抗振技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008. 47-50.

8 He Yong, Zhu Rihong, Chen Lei. Research of wave unwrapping algorithm based on the region growing theory [J]. Optical Technique, 2006, 32(4): 594-597.

何 勇, 朱日宏, 陈 磊. 基于区域生长理论的波面解包算法研究[J]. 光学技术, 2006, 32(4): 594-597.

9 Shi Yilei. Measurement Method of Thin Film Thickness Based on Phase-Shift Interferometry [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2009. 25-27.

- 石一磊. 基于相位偏移干涉术的薄膜厚度测量方法[D]. 西安: 西安工业大学, 2009. 25—27.
- 10 Xu Chunsheng. Study on Anti-Vibration Technology of the Simultaneous Phase-Shifting Interference [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006. 29—32.
徐春生. 同步移相抗振干涉的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006. 29—32.
- 11 J H Bruning, D R Herriott, J E Gallagher. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses [J]. Appl Opt, 1974, 13(11): 2693—2703.
- 12 Yang Yaoquan, Shi Ren, Yu Xining, *et al.*. An algorithm to raise the locating precision of laser spot center based on Hough transform [J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(12): 1655—1660.
杨耀权, 施仁, 于希宁, 等. 用 Hough 变换提高激光光斑中心定位精度的算法[J]. 光学学报, 1999, 19(12): 1655—1660.
- 13 Lou Yuehuan, He Ping'an, Xie Haining, *et al.*. A new method for detecting center of laser Newton rings based on hough transform algorithm [J]. Optoelectronic Technology, 2004, 24(3): 189—191.
楼越焕, 何平安, 谢海宁, 等. 基于 Hough 变换算法的激光牛顿环中心提取方法[J]. 光电子技术, 2004, 24(3): 189—191.
- 14 Fuzhong Bai, Xiaoqiang Wang, Kaizheng Huang, *et al.*. Analysis of spatial resolution and pinhole size for single-shot point-diffraction interferometer using in closed-loop adaptive optics [J]. Opt Commun, 2013, 297: 27—31.
- 15 Bai Fuzhong, Rao Changhui. Phase shift characteristic measurement and static distortion compensation for liquid crystal light modulator [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1487—1491.
白福忠, 饶长辉. 液晶空间光调制器相移特性测量与静态畸变补偿[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1487—1491.
- 16 R N Smartt, W H Steel. Theory and application of point-diffraction interferometers [J]. Japan Journal Applied Physics, 1975, 14(1): 351—356.
- 17 C Dunsby, Y Gu, P M W French. Single-shot phase-stepped wide-field coherence gated imaging [J]. Opt Express, 2003, 11(2): 105—115.
- 18 Fuzhong Bai, Zhen Liu, Xiaoyan Bao. Two-shot point-diffraction interferometer with an unknown phase shift [J]. Journal of Optics, 2010, 12(4): 045702.

栏目编辑: 史敏