

基于 SURF 和 RANSAC 算法的同步相移干涉图位置配准方法

靳京京, 卢文龙, 郭小庭, 刘晓军*

华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要 同步相移干涉技术通过同时获取多幅相移干涉图, 实现动态波面的相移干涉测量。为了保证测量精度, 在实施相移算法前, 需要对相移干涉图进行准确的位置配准。提出了一种结合加速稳健特征(SURF)提取算法和随机采样一致性(RANSAC)算法的多步干涉图位置配准方法, 通过配准具有一定特征的干涉背景图, 获得图像之间的变换关系并作用于相移干涉图, 实现同步相移干涉图位置配准。仿真分析表明, 该方法在光强不均的情况下对平移和旋转变换均具有较好的校准效果; 在含有高斯白噪声的情况下, 仍能进行配准获得变换矩阵, 完成相位恢复。将此方法应用于四步同步相移显微干涉测量仪对标准平面进行测量, 得到测量结果峰谷值为 23.2520 nm, 均方根值为 2.3149 nm。

关键词 测量; 同步相移干涉; 位置配准; 加速稳健特征提取算法; 随机采样一致性算法

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1012002

Position Registration Method of Simultaneous Phase-Shifting Interferograms Based on SURF and RANSAC Algorithms

Jin Jingjing, Lu Wenlong, Guo Xiaoting, Liu Xiaojun

School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Simultaneous phase-shifting interferometry obtains multiple phase-shifting interferograms simultaneously to realize phase-shifting interferometry of the dynamic wavefront. In order to ensure the measurement accuracy, it is necessary to perform accurate position registration of the phase-shifting interferograms before implementation of the phase shifting algorithm. A position registration method based on the speed up robust features (SURF) algorithm and the random sample consensus (RANSAC) algorithm is proposed. Through the registration of background image with certain characteristics, the transform relation between corresponding images is obtained, which is used for the phase-shifting interferogram to realize position registration of the simultaneous phase-shifting interferograms. The simulation results show that the method is effective on the translation and rotation transforms in the case of non-uniform light intensity. The method can also obtain transform matrix by registration to achieve phase recovery under the white Gaussian noise. The method is applied to measure the standard plane with a four-step simultaneous phase-shifting micro-interferometer, and the peak-to-valley value and root mean square value are 23.2520 nm and 2.3149 nm, respectively.

Key words measurement; simultaneous phase-shifting interferometry; position registration; speed up robust features algorithm; random sample consensus algorithm

OCIS codes 120.5050; 260.3160; 120.2650; 100.2960

收稿日期: 2017-03-17; **收到修改稿日期:** 2017-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(51475192)、湖北省科研条件与资源研究开发项目(2015BCE057)

作者简介: 靳京京(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事同步相移干涉技术相关算法和软件开发等方面的研究。

E-mail: M201570516@hust.edu.cn

导师简介: 卢文龙(1968—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事光电检测、精密测量、精密工程等方面的研究。

E-mail: hustwenlong@mail.hust.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: mexjl@163.com

1 引言

同步相移干涉技术^[1]通过采用瞬间同时采集的 3 幅及 3 幅以上具有固定相移间隔的相移干涉图,有效地避免振动、空气扰动等时变误差因素的影响,实现被测相位的实时动态高精度测量。在同步相移干涉技术中,无论是分光镜分光法^[2],还是激光全息光栅分光法,都是由电荷耦合器件(CCD)在同一时刻获得不同空间位置多幅相移干涉图。干涉图在空间上是相互分离的,因此需要进行位置配准,否则将引入相位恢复误差^[3]。

同步相移干涉图的配准问题已得到深入研究。Kiire 等^[4]通过特定的方法使 4 幅同步相移干涉图具有相似的灰度分布,采用相关运算确定各幅干涉图之间的位置匹配关系。Chen 等^[5]在光路中放入标记点,分光后各干涉图中均含该标记点,采用相关运算计算位置配准关系。左芬等^[6]采用标记光斑重心位置的方法获得图像因分割引入的平移误差。基于光斑的重心,田枫等^[7]提出基于统计分析方法的圆形域同步相移干涉图位置配准技术。郑东晖等^[8]也提出一种基于傅里叶平移特性的平移参数估计方法,通过建立图像在空域平移运动与频域线性相位差变化的对应关系,求得相对基准测试光斑的平移量,实现同步相移干涉图的空间位置配准。上述配准方式针对的是由图像分割引起的平移误差,其中一些方法以光斑的边缘为匹配特征,可以实现像素级甚至亚像素级的平移校正。采用分光棱镜进行的同步相移干涉,由于光路结构复杂,一方面光学衍射使光斑的边缘模糊,增加了光斑边缘的识别难度;另一方面获得的干涉图间还存在轻微的旋转变换以及图像的畸变,这必将对形貌的恢复结果造成影响。本文将加速稳健特征提取(SURF)算法^[9-11]和随机采样一致性(RANSAC)算法^[12-13]结合,获得图像之间的平移和旋转变换关系,进而实现同步相移干涉图的位置配准。

2 基本原理

同步相移干涉仪相位恢复与表面重建的流程如图 1 所示,4 幅干涉图的相移为 $\pi/2$ 。

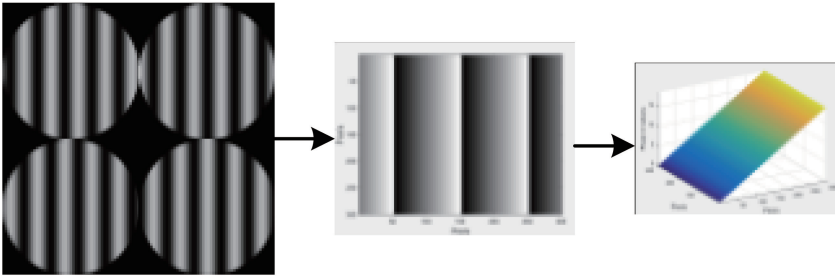


图 1 同步相移干涉的相位恢复与表面重建流程

Fig. 1 Phase retrieval and surface reconstruction flow of simultaneous phase-shifting interferometry

根据四步相移法求得相位为

$$\delta(x, y) = \arctan\left(\frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3}\right), \quad (1)$$

式中 $I_1 \sim I_4$ 分别是 4 幅干涉图的光强值。在进行波前相位重建时,需要对相移干涉图的空间位置进行配准,以确保每一被测点与相应的相移干涉强度对应,从而保证波前相位的重建精度。所提方法将 SURF 算法和 RANSAC 算法结合,获得图像之间的变换关系,进而实现相移干涉图的位置配准。具体实施步骤为: 1) 采用 SURF 算法对 4 幅干涉背景图进行特征提取,并对特征描述子进行描述; 2) 匹配提取的特征,并采用 RANSAC 算法获得图像之间的变换矩阵; 3) 依据变换矩阵对相移干涉图进行变换,实现对相移干涉图的配准。

2.1 SURF 算法特征提取及表达

同步相移干涉仪获得的背景图之间主要的变换是平移和旋转,需要对多幅干涉背景图进行配准。SURF 算法在尺度不变特征变换(SIFT)算法的基础上改进得到,对比例、旋转、平移变换具有不变性,提取特征更加稳定,多幅图时稳健性更好。SURF 算法是利用积分图像和 Hessian 矩阵加速图像卷积,并利用盒子滤波器代替高斯二阶导数滤波,通过保持图像尺度不变,用不同方向和尺度的盒子滤波器与图像卷积,得

到图像的尺度空间。在构造的尺度空间中,任一层的行列式与上下两层及其本点进行比较,确定极值,根据阈值筛选出符合条件的特征点,再利用 64 维特征向量进行描述,用于图像匹配。

2.1.1 Hessian 行列式近似

Hessian 矩阵是 SURF 算法的核心,给定图像 I 在点 $X(x, y)$ 处、尺度为 σ 下的 Hessian 矩阵为

$$\mathbf{H}(X, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(X, \sigma) & L_{xy}(X, \sigma) \\ L_{yx}(X, \sigma) & L_{yy}(X, \sigma) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $L_{xx}(X, \sigma)$ 是高斯二阶导函数 $\partial^2 g(\sigma) / \partial x^2$ 与图像 I 在 X 点处的卷积, $L_{xy}(X, \sigma)$ 、 $L_{yx}(X, \sigma)$ 和 $L_{yy}(X, \sigma)$ 的含义类似。

为了将模版与图像的卷积转换成盒子滤波器运算,需要对高斯二阶微分进行简化。对于 $\sigma=1.2$ 的高斯滤波器,设定模板的尺寸为 9 pixel \times 9 pixel,并用它作为最小尺度空间值对图像进行滤波和斑点检测。简化过程如图 2 所示。使用 D_{xx} 、 D_{xy} 和 D_{yy} 表示模板与图像进行卷积的结果,则 Hessian 矩阵判别式可表示为

$$\det(H_{\text{approx}}) = D_{xx}D_{yy} - (0.9D_{xy})^2. \quad (3)$$

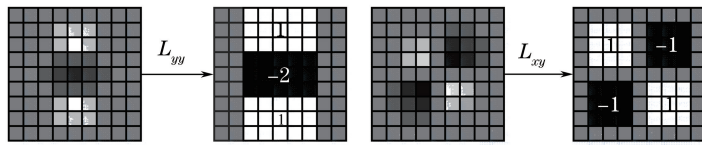


图 2 高斯二阶微分模版及其简化

Fig. 2 Second order differential Gaussian template and its simplification

2.1.2 尺度空间表达

要获取不同尺寸的斑点,必须建立图像的尺度空间。图像的尺度空间通常使用图像金字塔实现。通过采用不同尺度(σ)的高斯函数对图像进行平滑滤波,然后重采样以获得更高一层的金字塔。SURF 方法采用盒滤波和积分图像,通过不断增大盒滤波模板尺度建立图像金字塔。通过不同尺寸的盒滤波模板与积分图像求取 Hessian 矩阵行列式的响应图像,然后在响应图像上采用三维非极大值抑制,以获取各种不同尺度的特征。

2.1.3 SURF 算法特征描述子

为了进行基于特征点的图像分析,需要构建能够唯一描述特征点的展现方式,即从特征点提取描述子。如图 3 所示,选取以特征点为中心、边长为 $20s$ (s 为尺度因子)的正方形区域,其中正方形的边与特征点的主方向向量垂直。

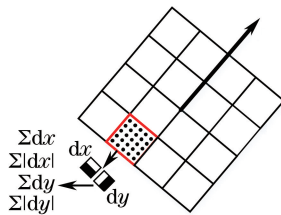


图 3 SURF 算法特征描述子的构造过程

Fig. 3 Construction process of feature descriptor in SURF algorithm

将边长为 $20s$ 的窗口划分为 4×4 个子窗口,每个子窗口包含 $5s \times 5s$ 个像素,使用尺寸为 $2s$ 的 Haar 小波模板进行响应值计算,得到沿主方向的 dy 和垂直于主方向的 dx 。以特征点为中心,对 dx 和 dy 进行高斯加权计算。最后,分别对每个子块的响应值进行统计,得到每个子块的向量为

$$\mathbf{V}_{\text{sub}} = \left[\sum dx \quad \sum |dx| \quad \sum dy \quad \sum |dy| \right]. \quad (4)$$

由于共有 4×4 个子块,因此,特征描述子共由 $4 \times 4 \times 4 = 64$ 维特征向量组成。SURF 算法描述子不仅具有尺度和旋转不变性,而且对光照的变化也具有不变性。使用小波响应本身具有亮度不变性,进一步的对比度不变性则是通过将特征向量归一化实现的。

2.2 特征描述子匹配

将待配准图的每个特征描述子向量与基准图像的全部特征描述子进行比较,将相似度最高(两个描述子向量之间的距离最短)的一对保留下来,作为最佳匹配项。两个描述子向量之间的距离采用差值的平方和(SSD)表示,即

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^N |x_{1i} - x_{2i}|^2}, \quad (5)$$

式中 d 为 N 维空间点 x_1 和 x_2 之间的距离。

由于场景中重复的元素会有相似的结构,在匹配的时候会产生歧义,一个特征点会与多个特征点很好地匹配,选中错误匹配的可能性很大。因此,需要为每个关键点找到两个最佳匹配项,排除与第二个匹配项非常接近的全部最佳匹配项。

2.3 图像变换关系求解

图像的几何变换关系为

$$[n_2 \quad m_2 \quad 1]^T = \mathbf{R} [n_1 \quad m_1 \quad 1]^T, \quad (6)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} s \cos \theta & s \sin \theta & t_x \\ -s \sin \theta & s \cos \theta & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 (n_1, m_1) 为待配准图中的点; (n_2, m_2) 为基准图中的点; θ 为旋转角; t_x 为列向平移量; t_y 为行向平移量。

采用 RANSAC 算法求解图像之间的变换矩阵 \mathbf{R} 。在存在误匹配点对的图像配准中,此方法可以有效地获得变换矩阵,具体的操作步骤如下:

- 1) 从全部 N 个匹配点对中随机抽取 S 个子集,每个子集 S_u 都包含 K 组匹配点对(K 为进行参数估计所需要的最少匹配点对,求解变换矩阵有 4 个未知量,故 $K=4$)。
- 2) 求解每个子集的变换矩阵 \mathbf{R}_a ,然后根据该变换矩阵计算所有 $N-4$ 个数据的残差 r_{i,R_a} 。
- 3) 设残差的阈值为 T_h ,如果残差小于 T_h ,则认为该数据为内点,否则认为是外点。
- 4) 累计内点个数为 Q_a ,内点数量最多的估计 \mathbf{R}_a 即为求解的变换矩阵。

3 方法精度的仿真分析

文献[3]给出的干涉方程为

$$\begin{aligned} I_i = & \tau_{oi}^2 A_o^2 \{ \cos^2 P_i + \sin(2Q) \sin[2(P_i - Q)] \sin^2(\delta/2) \} + \\ & \tau_{ri}^2 A_r^2 \{ \sin^2 P_i + \sin(2Q) \sin[2(P_i - Q)] \sin^2(\delta/2) \} + \\ & \tau_{oi} \tau_{ri} A_o A_r \cos(\varphi_o - \varphi_r + \varphi_{oi} - \varphi_{ri}) \times \{ \sin(2P_i) - \sin[2(P_i - Q)] \cos(2Q) \sin^2(\delta/2) \} + \\ & \tau_{oi} \tau_{ri} A_o A_r \sin(\varphi_o - \varphi_r + \varphi_{oi} - \varphi_{ri}) \sin[2(P_i - Q)] \sin \delta, \end{aligned} \quad (8)$$

式中 τ_{oi} 、 τ_{ri} 分别为测量光路和参考光路的衰减系数; δ 为 1/4 波片延迟精度,取 90° ; Q 为 1/4 波片安装角度,取 45° ; A_o 、 A_r 分别为测量光和参考光的初始振幅; P_i 为偏振片角度,分别取 0° 、 45° 、 90° 、 135° ; $\varphi_o - \varphi_r$ 为光路对测量光和参考光相位的影响; $\varphi_{oi} - \varphi_{ri}$ 为待求相位。

根据(8)式进行干涉图仿真,仿真结果如图 4 所示。图 4(a)为理想干涉图样,光路不衰减;图 4(b)为光强分布不均的干涉图样,衰减系数为小于 1 的随机数;考虑系统噪声多为高斯白噪声,图 4(c)为在理想干涉图样中加入 $\sigma^2=0.001$ 的高斯白噪声。

以图 4 所示的三种平面仿真干涉图为基础,对配准前后干涉图样求解的解包裹相位进行分析,评价配准方法的可行性。相应的平移变换的变换参数为 $-10 \sim 10$ pixel,旋转变换参数为 $-2^\circ \sim 2^\circ$ 。以实验系统获得的图像(图 5)为配准基准图像,对其进行相应的变换,通过上述方法获得变换矩阵,作用于仿真干涉图样。

对图 4 对应的干涉图样进行相位求解,配准前后的结果如图 6 所示,实验数据如表 1 所示。根据配准过程可知: SURF 点相对于几何变换和光亮度具有不变性,获得的特征具有较好的容错性,在光强不均的情况下对平移和旋转变换具有较好的校正效果。另外,在有错误匹配点对存在的情况下,使用 RANSAC 算法可

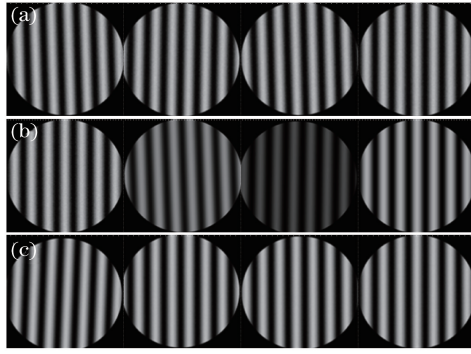


图 4 仿真干涉图样。(a)理想干涉图样;(b)光强不均干涉图样;(c)含高斯白噪声($\sigma^2=0.001$)干涉图样

Fig. 4 Simulated interferograms. (a) Ideal interferograms; (b) interferograms with non-uniform light intensity; (c) interferograms with white Gaussian noise ($\sigma^2=0.001$)

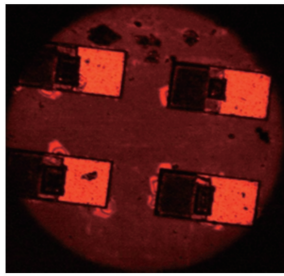


图 5 配准基准图像

Fig. 5 Registration reference image

以在剔除外点的同时计算得到图像之间的变换参数,是一种较为稳健的方法。根据仿真结果对比可知:配准前后相位误差明显减小,在光强不均和含有高斯白噪声的情况下,仍能进行配准,获得变换矩阵,完成相位恢复。因此所提出的配准算法具有较强的抗干扰性和较好的移植性,可以应用到同步相移干涉仪中。

表 1 相位误差的峰谷值(PV)和均方根值(RMS)

Table 1 PV and RMS of phase error

	PV of phase error /rad		RMS of phase error /rad	
	Before registration	After registration	Before registration	After registration
Fig. 6(a)、(b)	0.1322	0.0084	0.0324	0.0013
Fig. 6(c)、(d)	1.2016	0.0347	0.3146	0.0063
Fig. 6(e)、(f)	0.6559	0.4188	0.1008	0.0458

4 实验验证

在建立的图 7 所示同步相移干涉仪中对所提方法进行实验验证。光源选用波长 $\lambda = 620 \text{ nm}$ 的红色 LED。待配准图如图 8(a)所示,特征样板的特征点能够均匀分布在整个视场中,实验中使用硅刻样板,单元尺寸为 $0.30 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm}$ 。待测样件为平面反射镜,其干涉图如图 8(b)所示。对图 8(b)配准前后的三维形貌恢复结果进行比较,验证配准算法,并与白光干涉光学轮廓仪的测量结果进行比较。

对图 8(a)待配准图进行分割,以其中一幅图为基准,将其余三幅图与它进行基于 SURF 算法的图像配准,获得配准点对,利用 RANSAC 算法获得变换矩阵,作用于图 8(b)的干涉图样,对配准后的干涉图进行包裹相位求解。具体的实验结果如图 9 所示。

根据图 9(a)结果,未进行位置配准的干涉图相位恢复结果中峰谷值为 34.6221 nm ,均方根值为 4.3440 nm ,结果中存在明显的相位误差。位置配准后干涉图相位恢复结果如图 9(b)所示,峰谷值为 23.2520 nm ,均方根值为 2.3149 nm ,相位误差变小,相位恢复结果较好。图 9(c)为白光干涉光学轮廓仪测量结果,峰谷值为 18.3381 nm 。比较后可知,使用所提方法得到的三维形貌测量结果准确度较高。

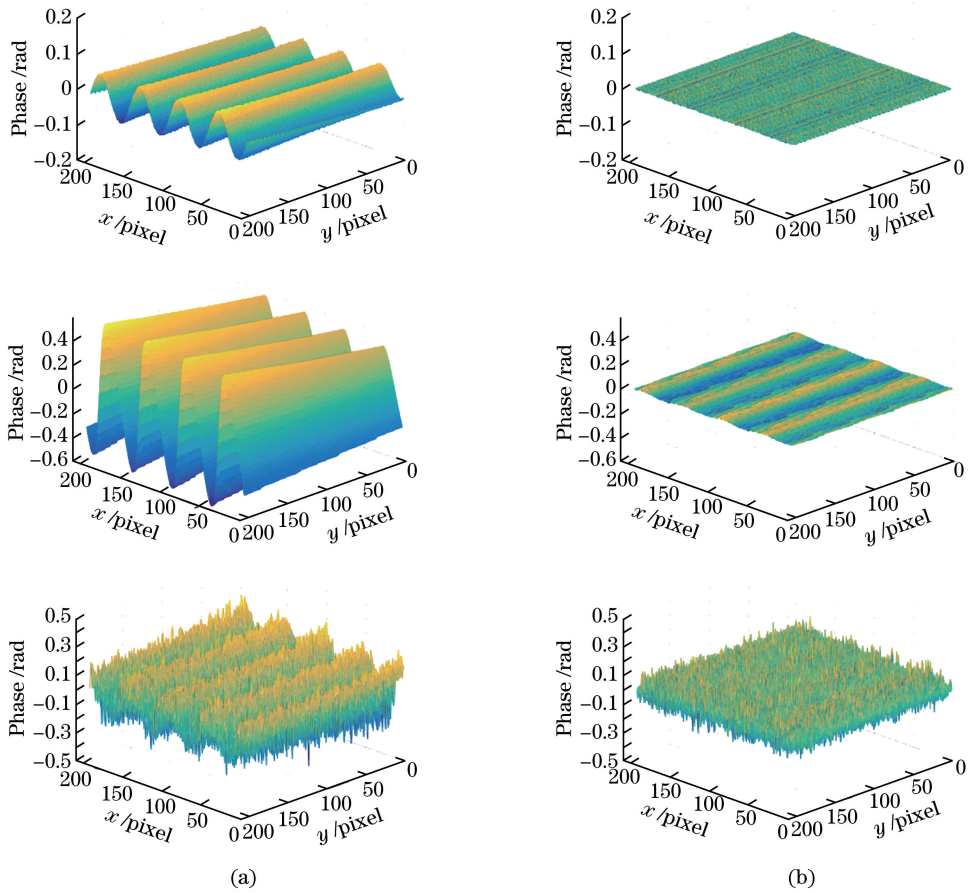


图 6 图 4 中图像的相位解包裹结果。(a)图 4(a)、(b)、(c)未配准;(b)图 4(a)、(b)、(c)配准后
 Fig. 6 Phase unwrapping results for the images in Fig. 4. (a) Before registration in Fig. 4 (a)、(b)、(c);
 (b) after registration in Fig. 4 (a)、(b)、(c)

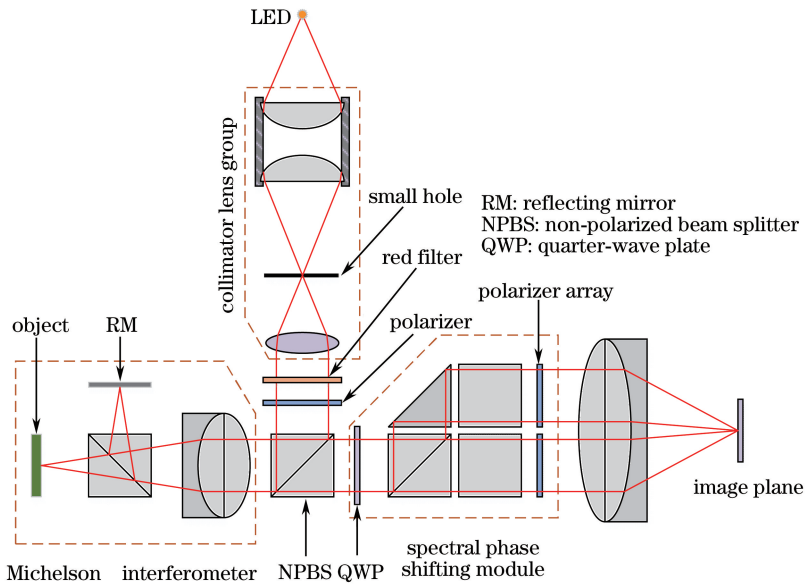


图 7 同步相移干涉仪光路原理图
 Fig. 7 Schematic of a simultaneous phase-shifting interferometer

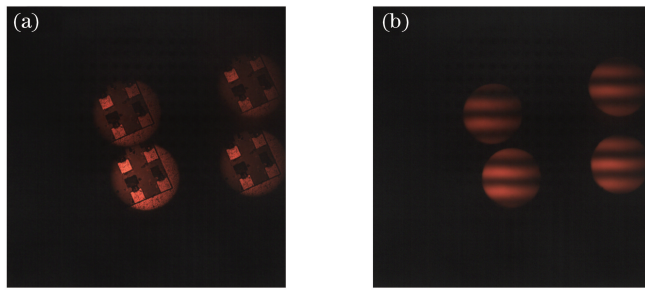


图 8 实验获取图像。(a)配准图;(b)反射镜的干涉图样

Fig. 8 Experimentally obtained images. (a) Registered images; (b) interferograms from the reflector

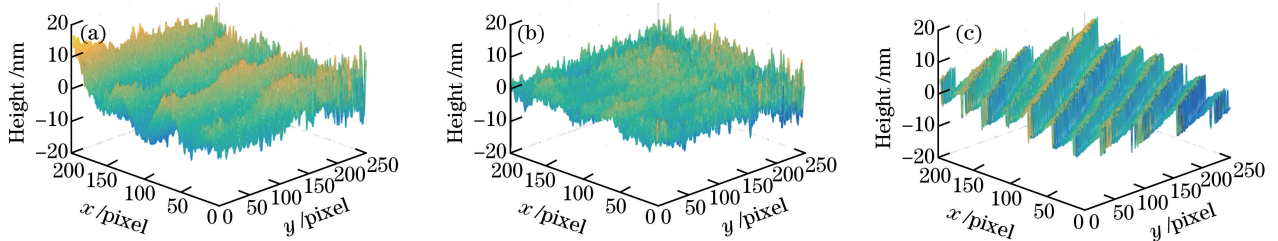


图 9 形貌恢复结果。(a)未配准形貌恢复结果;(b)配准后形貌恢复结果;(c)白光干涉光学轮廓仪测量结果

Fig. 9 Surface topography reconstruction results. (a) Surface topography reconstruction result before registration; (b) surface topography reconstruction result after registration; (c) measurement result obtained by white light interference profilometer

5 结 论

提出一种结合了 SURF 算法和 RANSAC 算法的方法,通过对背景图的配准,获得变换矩阵,应用于同步相移干涉图,间接实现干涉图的配准。相对于已有的方法,该方法不仅校准了因图像分割引起的平移误差,还对因光路引起的微小旋转误差有较好的校准效果,有效地保证波前重建精度与相位解包裹算法的成功实施。同时,在光强不均、有噪声的情况下,仍具有较好的校正效果。传统方式以光斑的边缘为特征,检测光斑的中心并以此校准分割引入的平移变换,然而光学衍射使光斑的边缘模糊,增加了光斑边缘的识别难度。本文提出的方法检测图像的 SURF 点,相对于几何变换和光亮度具有不变性,获得的特征具有较好的容错性。在应用过程中,该方法只需要测量前获得图像的变换矩阵,无需重复配准和在光路中放置标志点,提高了相位恢复速度,不影响表面形貌的实时测量,因此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,当存在一定的误配准点对时,仍可获得准确的变换矩阵,具有非常好的抗噪声干扰能力,能够应用于其他同步相移干涉仪中,实现干涉图位置配准。

参 考 文 献

- [1] Zuo Fen, Chen Lei. Development of anti-vibration technology in simultaneous phase-shifting interferometry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(11): 43-48.
左芬, 陈磊. 同步相移抗振光干涉测量技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(11): 43-48.
- [2] Park J, Kihm H, Kim S W. Point-diffraction fiber interferometer for vibration desensitization[C]. SPIE, 2005, 5856: 922-929.
- [3] Qian K M, Wu X P, Asundi A. Grating-based real-time polarization phase-shifting interferometry: error analysis[J]. Applied Optics, 2002, 41(13): 2448-2453.
- [4] Kiire T, Nakadate S, Shibuya M. Phase-shifting interferometer based on changing the direction of linear polarization orthogonally[J]. Applied Optics, 2008, 47(21): 3784-3788.
- [5] Chen Y F, Du Y L. One-shot surface profile measurement using polarized phase-shifting[C]. SPIE, 2009, 7511: 751102.
- [6] Zuo Fen. Study on the simultaneous phase-shifting anti-vibrational interferometry[D]. Nanjing: Nanjing University of

Science and Technology, 2008.

左芬. 同步相移干涉测量的抗振技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

- [7] Tian Feng, Bai Fuzhong, Wu Yaqin, *et al.* Position registration for simultaneous phase-shifting interferograms based on statistical analysis method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0626001.
田枫, 白福忠, 吴亚琴, 等. 基于统计分析方法的同步相移干涉图位置配准[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0626001.
- [8] Zheng Donghui, Chen Lei, Li Jinpeng, *et al.* Position registration for interferograms and phase-shifting error calibration in dynamic interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0226002.
郑东晖, 陈磊, 李金鹏, 等. 动态干涉仪干涉图位置配准及移相误差校正[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0226002.
- [9] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]. 7th IEEE International Conference on Computer Vision, 1999, 2: 1150-1157.
- [10] Bay H, Tuytelaars T, Gool L V. SURF: speeded up robust features[J]. *Computer Vision & Image Understanding*, 2006, 110(3): 404-417.
- [11] Feng Yidong, Sun Yue. Image matching algorithm based on SURF feature extraction and FLANN search[J]. *Journal of Graphics*, 2015, 36(4): 650-654.
冯亦东, 孙跃. 基于 SURF 特征提取和 FLANN 搜索的图像匹配算法[J]. *图学学报*, 2015, 36(4): 650-654.
- [12] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24(6): 381-395.
- [13] Chang Qing, Zhang Bin, Shao Jinling. Features image matching approach based on SIFT and RANSAC[J]. *Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 38(6): 747-751.
常青, 张斌, 邵金玲. 基于 SIFT 和 RANSAC 的特征图像匹配方法[J]. *华东理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 38(6): 747-751.