

## 基于配准修复的双目显微相位恢复

程鸿\*, 张齐杨, 沈川, 王丽, 向昕宇

安徽大学电子信息工程学院, 安徽 合肥 230039

**摘要** 双目相位恢复方法通过在倒置显微镜上安装双相机,再经过单次曝光获得的正负离焦图像计算得到相位信息,但是目镜的加工误差和相机的安装误差等会导致图像间存在平移、旋转,使得相位恢复结果不准确。提出一种基于配准修复和强度传输方程的双目显微相位恢复算法。首先对离焦图像进行配准,然后引入图像修复方法对由配准产生的黑色空穴区域进行填充和复原,最后使用边界条件下强度传输方程获取高精度的相位恢复结果。模拟实验的结果相关系数达到 0.9309,在微透镜阵列实验中,恢复结果与实际结果的相对误差为 2.8%,证明了所提方法的正确性与有效性。

**关键词** 图像处理; 相位恢复; 强度传输方程; 配准; 图像修复; 边界

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1210002

## Dual-Camera Phase Retrieval Based on Registration Restoration

Cheng Hong\*, Zhang Qiyang, Shen Chuan, Wang Li, Xiang Xinyu

School of Electronics and Information Engineering, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China

**Abstract** In the dual-camera phase retrieval method, the phase information is calculated by over-focus and under-focus images obtained through a single exposure after dual-cameras are installed on an inverted microscope. However, due to the processing error of the eyepiece and the installation error of the cameras, translation and rotation exist between the images, resulting in inaccurate phase retrieval results. In this regard, we proposed a dual-camera phase retrieval algorithm based on registration restoration and transport of intensity equation in this paper. Firstly, the defocusing image was registered. Then, image restoration was introduced to fill and restore the black cavity area caused by the registration. Finally, the transport of intensity equation under boundary conditions was used to acquire the high-precision phase retrieval results. The correlation coefficient of the simulation experiments reached 0.9309. In the experiment with a microlens array, the relative error between the restored result and the actual result was 2.8%, which proved the correctness and effectiveness of proposed method.

**Key words** image processing; phase retrieval; transport of intensity equation; registration; image restoration; boundary

**OCIS codes** 100.5070; 100.2000; 120.5050

## 1 引言

单色相干光波场可以用一个二维复振幅函数来完整地描述,此复振幅函数的幅角部分<sup>[1]</sup>即为相位,强度即为此复振幅函数的幅度的平方。图像中携带的大部分信息并不是振幅,而是相位成分<sup>[2]</sup>,可是人眼和其他探测器只能判断振幅变化而无法判断相位

的变化,导致无法区分物体内厚度或折射率不同的部分。如何利用强度信息来获得丢失的相位,是相位恢复领域的一个尤为重要的问题。

强度传输方程(TIE)是 Teague<sup>[3]</sup>于 1983 年在傍轴近似条件下推导出来的一种定量表征非干涉相位恢复方法,表述了光轴方向的强度微分量与光轴垂直平面上光波相位的定量关系。其中,轴向强度

收稿日期: 2020-10-22; 修回日期: 2021-01-24; 录用日期: 2021-02-01

基金项目: 安徽省高等学校自然科学研究项目(KJ2020ZD02, KJ2019ZD04)、安徽省自然科学基金(2008085MF209)

\* E-mail: chenghong@ahu.edu.cn

微分可以由光轴垂直平面上的强度差分量近似替代。因此实验中通常需要采集聚焦图像和离焦图像进行计算<sup>[4]</sup>。为了保证图像采集的实时性,江南大学的田晓琳<sup>[5]</sup>在倒置显微镜上安装双相机,单次曝光后获得正负离焦图像,该方法可以实现实时相位成像,但是物镜的加工误差和两个相机的安装误差等会导致所拍摄的画面存在平移、旋转等误差,可先将长方形玻璃板放置在两个 CCD 上表面以固定 CCD,再使用分辨率板作为参照物,通过精密平移台控制焦平面使其位于两个 CCD 所在像面的中心来解决上述问题。这种方法的过程较为复杂且对硬件的要求较高。安徽大学的程鸿等<sup>[6]</sup>使用配准的方法来消除离焦图像之间的平移和旋转误差,并得到较高的相位恢复精度,但是该方法在配准的过程中会出现黑色空穴区,为此,他们使用临近像素点复制填充的方法进行填充,该方法具有一定的局限性,当边缘的结构信息较多时,相位恢复精度较低。

针对以上问题,本文提出一种基于图像修复和强度传输方程的双目相位恢复算法,首先对双目显微下拍摄的离焦图像进行配准,然后引入图像修复的方法对由配准产生的黑色空穴区域进行填充和复原,最后使用在边界条件下强度传输方程的快速求解方法获取高精度的相位恢复结果。

## 2 强度传输方程

### 2.1 相干光场中的强度传输方程

在傍轴近似的条件下对波动方程进行推导计算可以得到单色相干光场下的强度传输方程,该方程表征光轴方向上光强的变化量与光轴垂直平面上光波的相位之间的关系,可表示为

$$-k \frac{\partial I(x, y, z)}{\partial z} = \nabla_{\perp} [I(x, y, z) \nabla_{\perp} \varphi(x, y, z)], \quad (1)$$

式中:  $I(x, y, z)$  表示光轴垂直方向上聚焦处的光强;  $\nabla_{\perp}$  表示二维梯度算子;  $z$  表示传输方向;  $k$  为波数,且  $k=2\pi/\lambda$ , 其中  $\lambda$  为光的波长;  $\varphi(x, y, z)$  表示物体的相位分布。  $\partial I(x, y, z)/\partial z$  为轴向强度微分,可以通过有限差分近似求得,结果如图 1 所示。

设  $I(x, y, z+\Delta z)$  与  $I(x, y, z-\Delta z)$  分别为离焦距离为  $\Delta z$  的正、负离焦强度,轴向强度微分与正、负离焦强度的关系为

$$\frac{\partial I(x, y, z)}{\partial z} \approx \frac{I(x, y, z+\Delta z) - I(x, y, z-\Delta z)}{2\Delta z}. \quad (2)$$

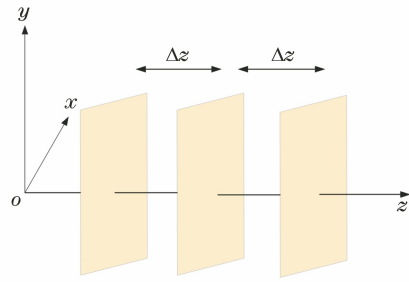


图 1 光强变化示意图

Fig. 1 Schematic of light intensity change

将(2)式代入(1)式,得到:

$$-k \frac{I(x, y, z+\Delta z) - I(x, y, z-\Delta z)}{2\Delta z} = \nabla_{\perp} [I(x, y, z) \nabla_{\perp} \varphi(x, y, z)]. \quad (3)$$

通过该方程即可求得相位这一未知量。经典的求解方法包括快速傅里叶变换法<sup>[7]</sup>、格林函数法<sup>[8]</sup>、多重网格法<sup>[9]</sup>,其中最常用的是快速傅里叶变换法,该方法具有简单、高效的特点。

### 2.2 部分相干光场中的广义强度传输方程

部分相干照明可以提高图像质量并抑制相干噪声,因此已被广泛应用于光学照明中。待测光场为准单色光场时,光波场近似只包含单一的光频率,使用维格纳分布函数<sup>[10]</sup>  $W(x, u)$  可以得到空间部分相干光场的广义强度传输方程,即

$$\frac{\partial I(x)}{\partial x} = -\lambda \nabla \cdot \int u W(x, u) du, \quad (4)$$

式中:  $u$  为  $x$  对应的空间频率坐标。当单色光波在空间中完全相干时,部分相干情况下其维格纳函数的一阶条件空间频率矩与相位的横向梯度的关系可表示为

$$\frac{\int u W(x, u) du}{\int W(x, u) du} = \frac{1}{2\pi} \nabla \phi_{\text{out}}(x, y, z). \quad (5)$$

在部分相干光场中,  $\phi_{\text{out}}(x, y, z)$  是一个广义相位,是照明光的相位  $\phi_{\text{in}}(x, y, z)$  和物体的相位  $\phi(x, y, z)$  的叠加,即

$$\phi_{\text{out}}(x, y, z) = \phi_{\text{in}}(x, y, z) + \phi(x, y, z). \quad (6)$$

当主级光源满足光轴对称的条件,即  $\phi_{\text{in}}(x, y, z)=0$  时,部分相干光的相位与传统相位吻合,对应的强度传输方程与完全相干照明情况下的强度传输方程完全一致。

## 3 基于配准修复和强度传输方程的双目相位恢复

针对引言中提到的问题,本文提出一种基于配

准修复和强度传输方程的双目相位恢复算法。在不考虑相机存在畸变、失真<sup>[11]</sup>的前提下,本文算法首先对相机采集到的正负离焦图像进行配准,以消除平移和旋转误差;然后,利用图像修复的方法对配准产生的黑色空穴区域进行填充与复原;最后,引入边界条件下强度传输方程的求解方法来得到高精度的相位恢复结果。

### 3.1 配准

所采用的双目显微镜系统的内部光路如图 2 所示。它由聚光镜、物镜、镜面和镜筒透镜组成。从本质来看,显微镜本身就是一套理想的远心成像 4f 系统<sup>[12]</sup>,由于 4f 系统成像呈严格的共轭关系,满足光轴对称<sup>[13]</sup>条件,因此可以使用完全相干条件下的强度传输方程来计算直接采集的离焦图像的相位结果。使用显微系统中的两个 CCD 同时采集到的正负离焦图像如图 3 所示。

从图 3 的局部放大图可以很直观地看出,同时采集到的图像存在很明显的平移和旋转。假设正离焦图像为  $I(x, y, z_0 + d)$ , 负离焦图像为  $I(x, y, z_0 - d)$ , 可以任意一幅离焦图像为基准来配准另一幅离焦图像。为了方便描述,设  $I(x, y, z_0 - d)$  为基准图像,首先从  $I(x, y, z_0 + d)$  和  $I(x, y, z_0 - d)$  中检测并提取 Harris 特征点<sup>[14]</sup>。其原理是取以

目标像素点为中心的一个窗口(一般为矩形区域)向任意方向移动微小距离,并记录窗口内的灰度变化量,其灰度变化量可以表示为

$$E(x, y) = \sum \omega_{x,y} (H_{x+u, y+v} - H_{x,y})^2 = \sum \omega_{x,y} \left[ u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} + o(\sqrt{u^2 + v^2}) \right]^2, \quad (7)$$

式中:  $u$  和  $v$  分别表示以  $(x, y)$  为中心的窗口在  $x$  和  $y$  方向上的偏移量;  $E(x, y)$  为窗口内灰度变化量;  $\omega_{x,y}$  为窗口函数;  $H$  为图像灰度函数;  $o(\sqrt{u^2 + v^2})$  为无穷小项。通过窗口内灰度在各个方向上变化的程度来确定特征点的位置信息。

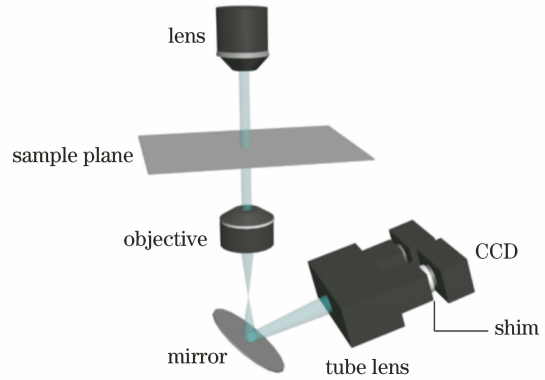


图 2 显微镜光路图

Fig. 2 Light path of microscope

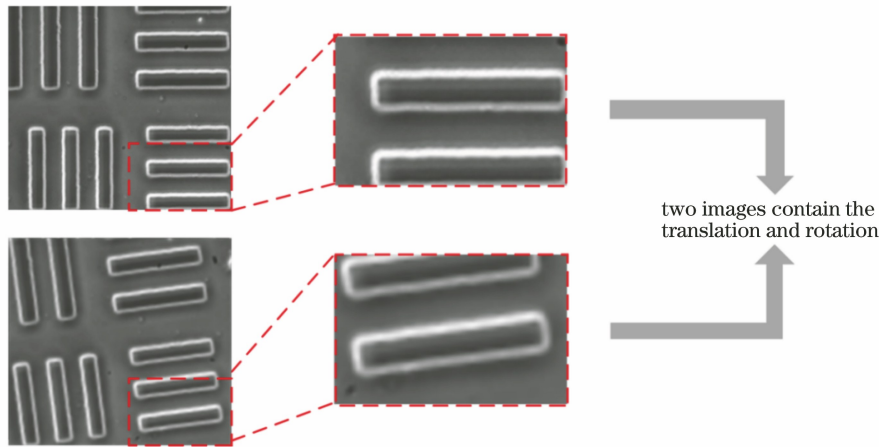


图 3 采集图像间的平移和旋转

Fig. 3 Translation and rotation between captured images

然后,对两幅图像之间的特征点进行匹配,并比较两幅匹配图像上特征点之间的归一化互相关度<sup>[15]</sup>,计算得到的最大相关系数对应最佳匹配。再使用 RANSAC 算法<sup>[16]</sup>进行特征点对的提纯,用对应特征点的均方根误差作为提纯标准,即

$$R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{\omega} \| f(q'_i, \mathbf{T}') - p'_i \|^2 / \omega}, \quad (8)$$

式中:  $q'_i$  与  $p'_i$  为一对匹配点对;  $\omega$  是匹配的点对数量。当  $R_{\text{RMSE}} < c$  (阈值) 的匹配点对数量越多,根据匹配点求得的图像间的空间变换模型  $\mathbf{T}'$  越好。空间变换模型  $\mathbf{T}'$  可表示为

$$\mathbf{T}' = \begin{bmatrix} \cos \theta' & -\sin \theta' & t'_x \\ \sin \theta' & \cos \theta' & t'_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中:  $\theta'$  为旋转角;  $t'_x, t'_y$  为平移参数。

最后, 根据变换模型  $T'$  对正离焦图像  $I(x, y, z_0 + d)$  进行几何变换, 使得两幅离焦图像处于同一空间位置, 关系由(10)式表示, 配准流程如图 4 所

示。可惜的是, 配准在解决平移和旋转问题的同时引入了黑色空穴问题。

$$I_r(x, y, z_0 + d) = T'[I(x, y, z_0 + d)]. \quad (10)$$

式中:  $I_r(x, y, z_0 + d)$  表示配准后的图像。

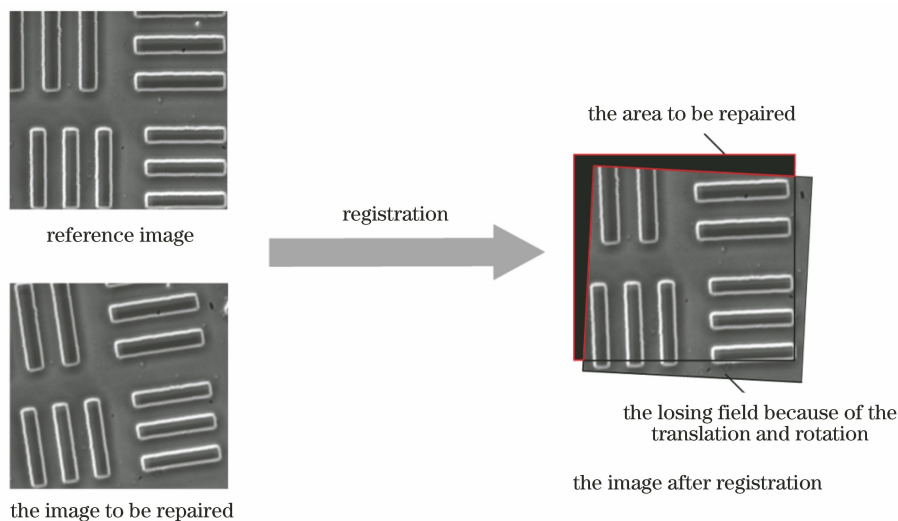


图 4 配准流程示意图

Fig. 4 Registration flow diagram

### 3.2 图像修复

针对配准后的图像  $I_r(x, y, z_0 + d)$  中的黑色空穴, 所提算法利用图像修复方法进行修补, 其中, 待修复区域的准确定位最为重要。首先, 对  $I_r(x,$

$y, z_0 + d)$  进行二值化, 再使用连通域标记法<sup>[17]</sup> 记录二值化图像所有像素值为 0 的连通域面积, 如果连通域面积小于设定的阈值, 则定义为噪声并予以去除, 其详细过程如图 5 所示。

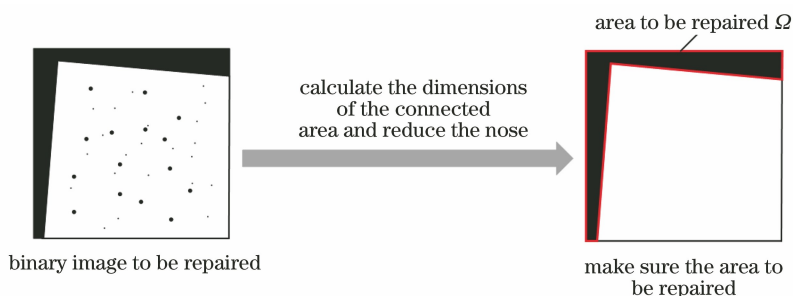


图 5 确定待修复区域

Fig. 5 Identifying areas to be repaired

去除噪声的图像中所有灰度值为 0 的像素点会被定义为待修复区域, 记作  $\Omega$ ,  $I - \Omega$  的部分表示已知信息的区域,  $p$  点表示待修复区域和已知区域边界上修复优先权最大的像素点,  $\Phi_p$  表示以  $p$  为中心的  $9 \times 9$  像素区域, 该区域含有一部分待填充的像素点,  $\nabla I_p^\perp$  表示  $p$  的等照度线方向,  $n_p$  表示  $p$  点的法向量。

Criminisi 图像修复算法<sup>[18]</sup> 适合填充大面积破损区域, 较好地解决了当图像边缘有大量结构信息时, 传统修复方法无法有效修复图像边缘的问题, 该修复算法原理如图 6 所示。

首先确定图像中待修复区域边界优先权最大的

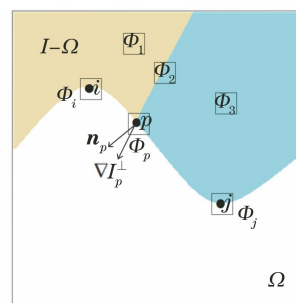


图 6 Criminisi 算法示意图

Fig. 6 Schematic of Criminisi algorithm

像素点, 并估计  $\Phi_p$ , 计算边界上像素点的优先权



$P(p)$ , 具体为

$$P(p) = C(p) \times D(p), \quad (11)$$

式中:  $C(p)$  为置信度项, 代表目标块  $9 \times 9$  的像素区域包含已知信息的比例;  $D(p)$  为数据项, 代表目标块  $9 \times 9$  的像素区域中优先得到修复的结构信息量。  $C(p)$  与  $D(p)$  结合, 能使待修复边缘的目标块中已知像素数量和结构信息量达到平衡。  $C(p)$  与  $D(p)$  的具体表达式为

$$C(p) = \frac{\sum_{p \in \Phi_p \cap (I-\Omega)} C(q)}{|\Phi_p|}, \quad (12)$$

$$D(p) = \frac{|\nabla I_p^\perp \times r_p|}{\alpha}, \quad (13)$$

式中:  $|\Phi_p|$  是  $\Phi_p$  的面积;  $\alpha$  表示归一化因子;  $r_p$  用于衡量目标块  $\Phi_p$  中已知信息所占的比例;  $\sum_{p \in \Phi_p \cap (I-\Omega)} C(q)$  表示以点  $p$  为中心的  $9 \times 9$  区域中完好区域的面积。

在边界的像素点中找到修复优先权最大的点  $p$  后, 在已知区域内搜索修复块, 设  $\Phi_q$  表示优先级最高的待修复块, 那么已知区域的最佳样本块  $\Phi'_q$  确定方式为

$$\Phi'_q = \operatorname{argmin}_{\Phi'_q \in \Omega} d(\Phi_q, \Phi'_q), \quad (14)$$

式中:  $d(\Phi_q, \Phi'_q)$  表示  $\Phi_q$  和  $\Phi'_q$  之间的距离。

$$d(\Phi_q, \Phi'_q) = \sum_i \sum_j |\Phi_q(i, j) - \Phi'_q(i, j)|^2. \quad (15)$$

再将最佳样本块填充到待修复块中, 不断重复以上过程直至待修复区域修复完整后停止修复, 修复完成的正离焦图像记为  $I'_r(x, y, z_0 + d)$ 。

### 3.3 相位恢复

由 1.1 节可知, 通常求解强度传输方程需要 3 幅强度图像计算强度微分。本文算法中, 聚焦图像近似由  $I(x, y, z_0 - d)$  与  $I'_r(x, y, z_0 + d)$  的平均强度来替代<sup>[5]</sup>, 记作  $I_f(x, y, z_0)$ 。

强度传输方程求解相位的常用方法已经在 1.1 节提到, 为了避免边界误差, 最常见的做法就是将物体放在图像的中央<sup>[19]</sup>, 但是这并不能反映一般情形。在真实的实验中样品细胞大部分为连续细胞, 边缘部分的连续细胞将会逐点影响整个区域, 因此本文算法引入了边界条件下强度传输方程的求解方法<sup>[20]</sup>, 该方法不仅解决了在光强分布不均匀时边界条件的获取、分离, 正确定义求解区域等问题, 还保留着快速傅里叶变换法的简单、高效的特点。

使用格林函数给出强度传输方程解析解的另一

种积分表达式, 即

$$\varphi(r) = \iiint_{\sigma} \nabla \cdot (I_f^{-1} \nabla \psi) G(r, r') dr, \quad (16)$$

式中:  $\sigma$  表示闭区间;  $\nabla \cdot (I_f^{-1} \nabla \psi)$  表示向量场散度;  $G(r, r')$  为格林函数, 可以由拉普拉斯算子的特征函数展开。

$$G(r, r') = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Psi_{m,n}(r) \Psi_{m,n}(r')}{\lambda_{m,n}}, \quad (17)$$

式中:  $\Psi_{m,n}$  为拉普拉斯算子的特征函数式;  $\lambda_{m,n}$  是相应的特征值。

$$\nabla \cdot (I_f^{-1} \nabla \psi) =$$

$$\partial_{x-\text{DCT}}(I_f^{-1} \partial_{x-\text{DCT}} \psi) + \partial_{y-\text{DCT}}(I_f^{-1} \partial_{y-\text{DCT}} \psi), \quad (18)$$

式中:  $\psi$  表示为辅助函数;  $\nabla \psi$  表示辅助函数的梯度。 (16) 式的最终求解方法为

$$\varphi(x, y, z) = -k \nabla_{\text{DCT}}^{-2} \frac{I_f^{-1} \partial I}{\partial z}, \quad (19)$$

式中:  $\nabla_{\text{DCT}}$  表示基于离散余弦变换构建的哈密顿算子, 也表示向量场的散度。根据 (19) 式便可以求解出最终的相位结果。

本文算法的流程如图 7 所示。

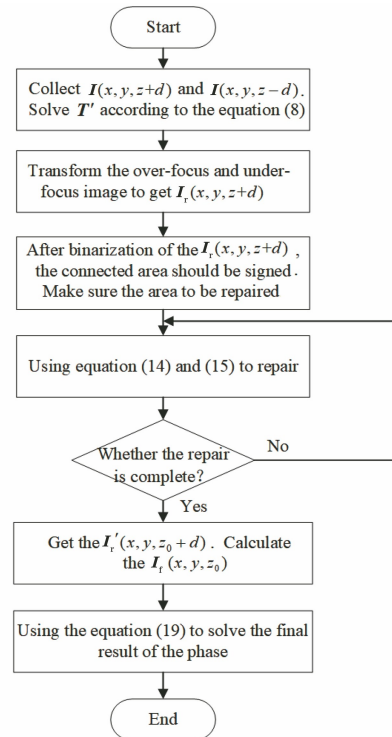


图 7 本文算法流程

Fig. 7 Flow chart of proposed algorithm

## 4 实验与分析

### 4.1 模拟实验

实验选取强度为 1 的纯相位物体作为初始的模拟相位, 物体像素尺寸为  $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ , 像素大小  $m \times$

$n = 1388 \text{ pixel} \times 1040 \text{ pixel}$ , 设定波长  $\lambda = 532 \text{ nm}$ , 分别沿着前、后角谱的传播方向传播  $30 \mu\text{m}$  之后得到正、负离焦强度图, 如图 8(b)、(c) 所示; 再对正离焦图像平移 5 pixel 以及旋转  $1^\circ$  得到图 8(d) 所示的图像,

用来模拟两幅离焦图像实际存在的平移和旋转。图 8(e) 是通过图 8(c)、(d) 平均近似得到的聚焦强度, 图 8(f) 是未进行任何处理直接通过强度传输方程求解的相位结果。

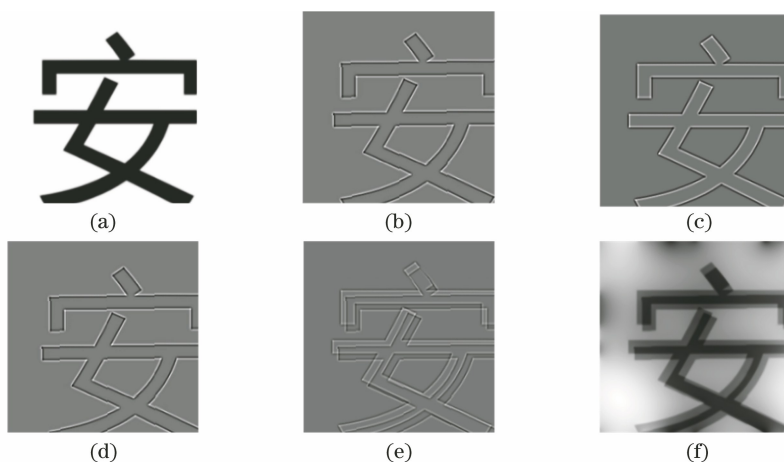


图 8 未经过配准修复的相位恢复图像。(a) 初始相位; (b) 正离焦图像; (c) 负离焦图像; (d) 平移旋转后的正离焦图像; (e) 聚焦强度图像; (f) 未经过任何处理直接求解恢复的相位结果

Fig. 8 Phase retrieval images without over-registration restoration. (a) Initial phase; (b) over-focus image; (c) under-focus image; (d) over-focus image after translation and rotation; (e) focus intensity image; (f) phase result of the retrieval image solved directly without any processing

显然, 平移、旋转的存在导致相位恢复的结果不够理想。采用本文算法首先对正、负离焦图像进行配准, 配准后的图像如图 9(b) 所示。与图 9(a) 作为基准的负离焦图像进行对比, 发现本文算法基本消除了离焦图像之间的平移和旋转误

差, 同时图像中出现了黑色空穴。因此, 需要通过算法对配准后的图像进行填充。图 9(c)、(d) 所示分别为使用文献[6]算法和本文算法得到的正离焦图像, 计算得到的聚焦强度分别如图 9(e)、(f) 所示。文献[6]算法和本文算法求解出的相位结

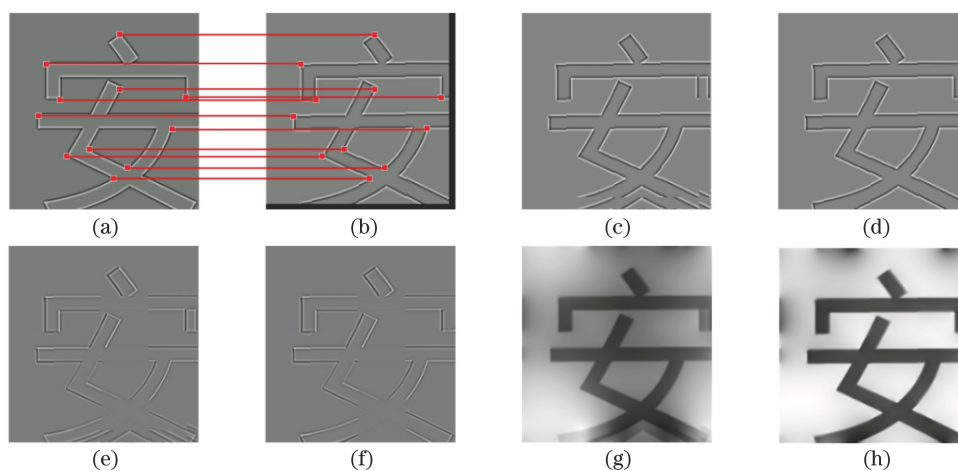


图 9 经过配准修复的相位恢复图像。(a) 负离焦图像; (b) 待修复的正离焦图像; (c) 用文献[6]方法修复的图像; (d) 使用本文方法修复的图像; (e) 文献[6]方法求得的聚焦强度; (f) 本文方法求得的聚焦强度; (g) 文献[6]方法恢复的相位结果; (h) 本文方法恢复的相位结果

Fig. 9 Phase retrieval images after registration restoration. (a) Under-focus image; (b) over-focus image to be repaired; (c) image repaired by the method in Ref. [6]; (d) image repaired by the proposed method; (e) focusing intensity obtained by the method in Ref. [6]; (f) focusing intensity obtained by the proposed method; (g) phase result retrieved by the method in Ref. [6]; (h) phase result retrieved by the proposed method

果分别如图 9(g)、(h) 所示。

为了更直观地表示两种方法填充黑色空穴的相位结果的准确性,将图 9(g)、(h) 恢复相位的相关系数  $R$  和均方根误差  $R_{\text{RMSE}}$  进行对比。

$$R = \frac{\sum_m \sum_n (\varphi_0 - \varphi_{0\text{-ave}}) \varphi - \varphi_{\text{ave}}}{\sqrt{\left[ \sum_m \sum_n (\varphi_0 - \varphi_{0\text{-ave}})^2 \right] \left[ \sum_m \sum_n (\varphi - \varphi_{\text{ave}})^2 \right]}}, \quad (20)$$

式中:  $\varphi_0$ 、 $\varphi$ 、 $\varphi_{0\text{-ave}}$ 、 $\varphi_{\text{ave}}$  分别表示初始相位和最终恢复的相位及对应的均值。

$$R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\sum_{x,y} [\varphi - \varphi_0]^2 / (m \times n)}. \quad (21)$$

定量分析误差的结果如表 1 所示,充分证明了本文方法的正确性与有效性。进一步,参照(20)式计算了图 8(b)与图 9(d) 图像之间的相关系数,其值

表 1 不同方法下的相关系数和均方根误差对比

Table 1 Comparison of correlation coefficient and root mean square error under different methods

Method	Method in Ref. [6]	Proposed method
$R$	0.7010	0.9309
$R_{\text{RMSE}}$	0.4724	0.1885

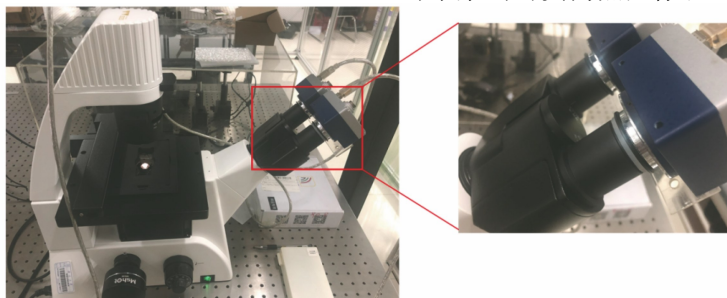


图 10 双相机动态相位成像系统实验装置

Fig. 10 Experimental device of dual-camera dynamic phase imaging system

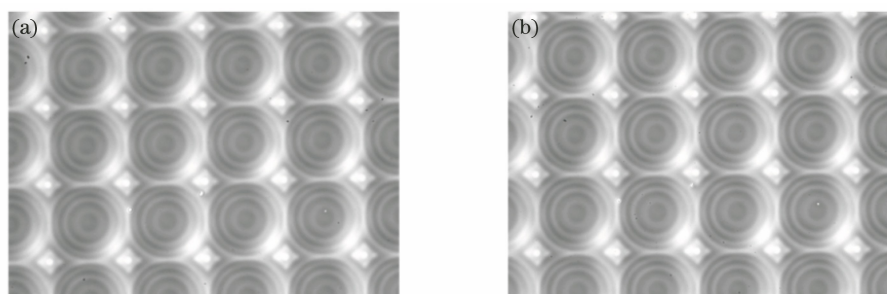


图 11 同时采集的离焦图像。(a) 负离焦图像; (b) 正离焦图像

Fig. 11 Defocus images acquired simultaneously. (a) Under-focus image; (b) over-focus image

对图 11(a)、(b) 进行配准之后得到的负离焦图像如图 12(a) 所示,再分别使用文献[6]方法与本文方法对配准产生的黑色空穴区域进行填充和复原,

为 0.97317,由此证明了经过本文算法配准修复后确实可以得到较为准确的离焦图像。

## 4.2 真实实验

搭建了图 10 所示的实验平台,其中显微系统为生物倒置显微镜 MI52,物镜为无限远工作距离平场消色差  $10\times$  相衬物镜,数值孔径  $NA$  为 0.25,物镜工作距离为 4.3 mm,分辨率为  $2\ \mu\text{m}$ ,载物台为机械式移动载物台,移动范围为  $135\ \text{mm}\times 77\ \text{mm}$ ,显微镜的光源为白光 LED 照明光源,并通过一个中心波长为 532 nm、半峰全宽为 22 nm 的滤光片进行滤波。实验使用的 CCD (分辨率为  $1388\ \text{pixel}\times 1040\ \text{pixel}$ ,像素尺寸为  $4\ \mu\text{m}\times 4\ \mu\text{m}$ ) 分别安装在显微镜筒上实现图像采集。配套的图像采集软件为 Neptune Camera,将具有 3 mm 固定厚度的硅胶线圈安装在其中一个 CCD 上,与目镜筒之间实现 1.5 mm 的离焦,微透镜阵列 (MLA150-7AR-M, Thor labs) 被用作真实实验的样本,微透镜阵列的材料为熔融石英,折射率为 1.458,高度为  $1.11\ \mu\text{m}$ 。实验前使用分辨率板对相机进行视场校正后采集图像。图 11(a)、(b) 所示分别为 CCD 同时采集到的负离焦图像和正离焦图像。

结果如图 12(b)、(c) 所示。最后分别使用文献[6]方法与本文方法求解相位结果,如图 12(d)、(e) 所示。

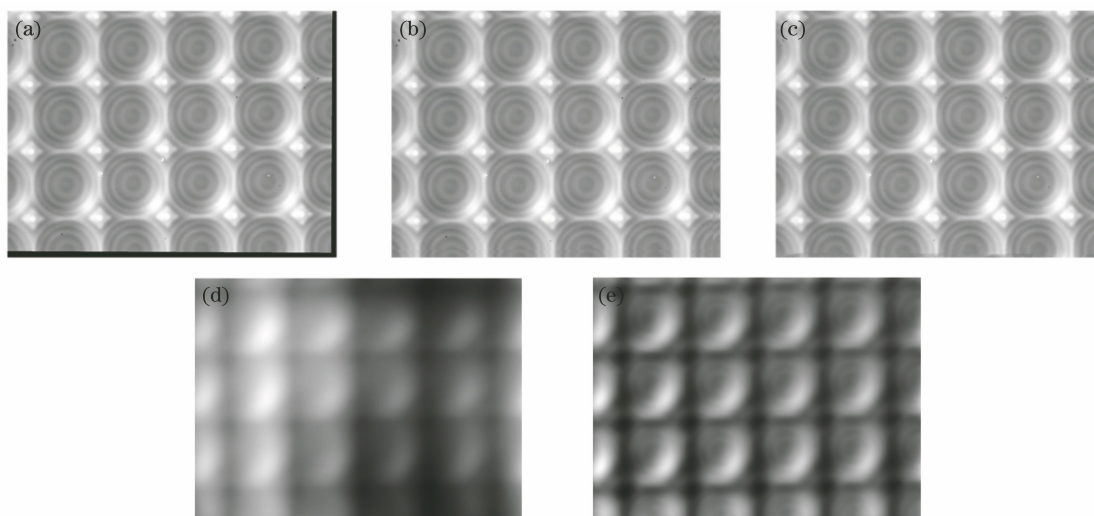


图 12 微透镜阵列实验结果。(a)待修复的负离焦图像;(b)使用文献[6]方法修复的图像;(c)使用本文方法修复的图像;  
(d)文献[6]方法恢复的相位结果;(e)本文方法恢复的相位结果

Fig. 12 Experimental results of microlens array. (a) Under-focus image to be repaired; (b) image restored by the method in Ref. [6]; (c) image restored by the proposed method; (d) phase result retrieved by the method in Ref. [6]; (e) phase result retrieved by the proposed method

透镜高度的计算公式为

$$L = \frac{\varphi_o(x', y')}{k \cdot \Delta n}, \quad (22)$$

式中: $L$  为样品高度; $\varphi_o(x', y')$  为相位结果; $k$  为波数; $\Delta n$  为折射率差。利用文献[6]方法和本文方法计算透镜高度,两种方法求得的相位结果、三

维显示图像以及相位结果图像中实线标示位置的高度测量如图 13 所示。针对相位结果图像中实线标示位置,文献[6]方法计算得到的高度约为  $0.6967 \mu\text{m}$ ,与真实高度的相对误差为  $37.2\%$ ;本文方法计算的高度约为  $1.0789 \mu\text{m}$ ,与真实高度的相对误差为  $2.8\%$ 。

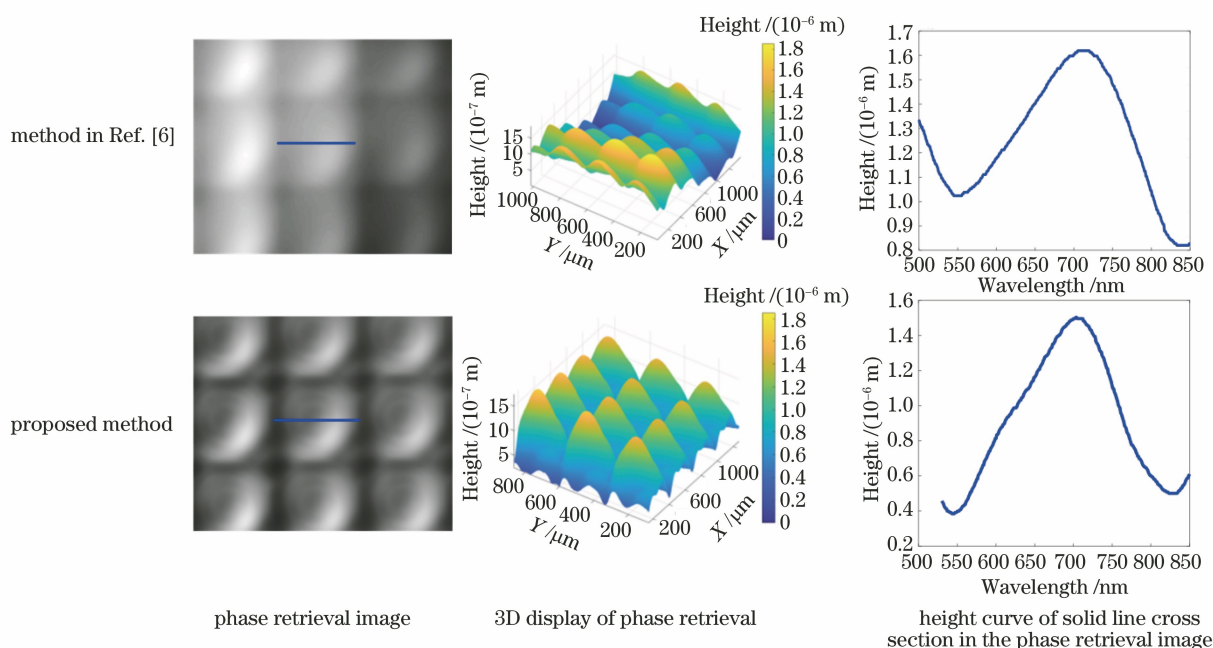


图 13 微透镜阵列实验结果

Fig. 13 Experimental results of microlens array



## 5 结 论

在双目相位恢复实验中,所采集到的两幅离焦图像之间会存在平移和旋转误差,必然会影响最终的相位恢复精度。本研究提出一种基于配准修复的相位求解方法,首先对原始散焦图像进行配准,然后利用 Criminisi 图像修复算法对配准后的离焦图像进行修复,最后使用在边界条件下强度传输方程的解法求解出相位结果,模拟实验与真实实验结果都说明了所提方法的有效性和正确性。

## 参 考 文 献

- [1] Cowley J M. Diffraction physics[M]. Amsterdam: North Holland Pub., Co., 1975.
- [2] Zuo C, Li J J, Sun J S, et al. Transport of intensity equation: a tutorial [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 135: 106187.
- [3] Teague M R. Deterministic phase retrieval: a Green's function solution [J]. Journal of Optical Society of America, 1983, 73(11): 1434-1441.
- [4] Zhang L, Tang Q J, Deng D N, et al. Field-of-view correction for dual-camera dynamic phase imaging based on transport of intensity equation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0804005.  
张璐, 汤其剑, 邓定南, 等. 基于光强传输方程的双相机动态相位成像的视场校正 [J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0804005.
- [5] Tian X L. Quantitative phase imaging technology based on transport of intensity equation [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.  
田晓琳. 基于强度传播方程的生物细胞定量相位恢复技术 [D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- [6] Cheng H, Xiong B L, Wang J C, et al. Phase retrieval based on registration progressive compensation algorithm [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(4): 0410002.  
程鸿, 熊帮玲, 王金成, 等. 基于配准递进补偿的相位恢复 [J]. 光子学报, 2019, 48(4): 0410002.
- [7] Allen L J, Oxley M P. Phase retrieval from series of images obtained by defocus variation [J]. Optics Communications, 2001, 199(1/2/3/4): 65-75.
- [8] Woods S C, Greenaway A H. Wave-front sensing by use of a Green's function solution to the intensity transport equation [J]. Journal of Optical Society of America, 2003, 20(3): 508-512.
- [9] Xue B D, Zheng S L, Jiang Z G. Phase retrieval using transport of intensity equation solved by full multigrid method [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(6): 1514-1518.
- [10] Lu X Y, Zhao C L, Cai Y J. Research progress on methods and applications for phase reconstruction under partially coherent illumination [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500016.  
卢兴园, 赵承良, 蔡阳健. 部分相干照明下的相位恢复方法及应用研究进展 [J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500016.
- [11] Sun Q C, Hou Y Q, Chen J. Lens distortion correction for improving measurement accuracy of digital image correlation [J]. Optik, 2015, 126(21): 3153-3157.
- [12] Mi C K. Modulating the statistical properties of a vector partially coherent beam by a  $4f$  optical system [D]. Suzhou: Soochow University, 2019.  
糜宸坤. 利用  $4f$  光学系统调控部分相干矢量光束特性研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2019.
- [13] Zuo C, Chen Q, Sun J S, et al. Non-interferometric phase retrieval and quantitative phase microscopy based on transport of intensity equation: a review [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(6): 0609002.  
左超, 陈钱, 孙佳嵩, 等. 基于光强传输方程的非干涉相位恢复与定量相位显微成像: 文献综述与最新进展 [J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0609002.
- [14] Zhang J S, Zhang H M, Luo Y T, et al. Image registration method based on improved Harris corner detection algorithm [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(2): 230-233.  
张见双, 张红民, 罗永涛, 等. 一种改进的 Harris 角点检测的图像配准方法 [J]. 激光与红外, 2017, 47(2): 230-233.
- [15] Wang C Y, Chen J B, Chen J S, et al. Unmanned aerial vehicle oblique image registration using an ASIFT-based matching method [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2018, 12(2): 025002.
- [16] Vourvoulakis J, Kalomiros J, Lygouras J. FPGA-based architecture of a real-time SIFT matcher and RANSAC algorithm for robotic vision applications [J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(8): 9393-9415.
- [17] Robert M H, Linda G S. Computer and robot vision [M]. Boston: Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1992.
- [18] Qi J H. Image inpainting method based on image partition and improved Criminisi algorithm [J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(1): 63-66.  
齐巨慧. 基于图像分块和改进 Criminisi 算法的图像修复方法 [J]. 现代电子技术, 2020, 43(1): 63-66.
- [19] Barty A, Nugent K A, Paganin D, et al.

- Quantitative optical phase microscopy [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(11): 817-819.
- [20] Zuo C. Research on noninterferometric phase retrieval and quantitative phase microscopy methods based on transport of intensity equation [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- 左超. 基于光强传输方程的非干涉相位恢复与定量相位显微成像方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.