

基于离焦型夏克-哈特曼传感器的定量相位成像技术

宋静威^{1,2,3}, 李常伟^{1,2,3*}, 张思炯^{1,2,3}¹中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;²中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏 南京 210042;³中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

摘要 提出了一种基于离焦型夏克-哈特曼传感器的定量相位成像技术。该技术利用离焦型夏克-哈特曼波前传感器记录两种不同波长的光的照射下的强度分布图,采用双波长相位恢复算法进行相位恢复,获得了透过相位物体的数字光场,实现了纯相位物体成像。数值模拟结果表明该定量相位成像技术方法简单、精度高、收敛速度快,是一种非常具有潜力的定量相位成像技术。

关键词 成像系统; 双波长; 定量相位成像; 离焦型夏克-哈特曼传感器; 相位恢复

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0911002

Quantitative Phase Imaging Based on Defocused Shack-Hartmann Sensor

Song Jingwei^{1,2,3}, Li Changwei^{1,2,3*}, Zhang Sijiong^{1,2,3}¹National Astronomical Observatories, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;²Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology (Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology), Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;³School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In this paper, an approach using a defocused Shack-Hartmann sensor for quantitative phase imaging (QPI) is proposed. In this technology, the defocused Shack-Hartmann wavefront sensor is used to record the intensity distribution under the illumination of light with two different wavelengths, and the dual wavelength phase retrieval algorithm is used for phase retrieval. The digital light field through the phase object is obtained, and the imaging of pure phase objects is realized. Numerical simulation results show that the QPI method is simple and with high accuracy and fast convergence, which is a very promising QPI technology.

Key words imaging systems; dual-wavelength; quantitative phase imaging; defocused Shack-Hartmann sensor; phase retrieval

OCIS codes 110.3010; 110.1758; 100.5070

1 引言

在生命科学领域,需要观察的大部分生物细胞都是无色且透明的,传统的显微镜无法对其进行成像。早期的解决方法是对细胞进行染色,然而这种做法会导致细胞丧失活性,无法实现活体细胞观测。

相衬显微镜虽然可以将透明细胞的相位信息转化为强度信息记录下来,实现相位成像,但是无法实现细胞结构的定量测量,而且仅适用于相位较小的情况。传统的“所见即所得”的成像模式在显微领域遭遇瓶颈,计算成像技术应运而生^[1]。定量相位成像就是生物显微领域内的重要计算成像技术。目前,实现

收稿日期: 2020-10-09; 修回日期: 2020-11-17; 录用日期: 2020-12-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11873069)、国家自然科学基金青年科学基金(11703060,11803058)

* E-mail: cwli@niaot.ac.cn

定量相位成像技术的途径主要有两种,一种是依靠全息和干涉技术记录透明物体的相位,另一种是记录光场通过透明物体的衍射强度图,从记录的强度图中提取物体的相位。

数字全息显微术是定量相位成像技术最为热门的研究方向之一。该技术并不直接记录被观测物体的强度图像,而是记录包含被观测物体波前信息的全息图,再利用计算机对所记录的全息图进行数值重建,继而定量地获得被测物体的相位信息^[2]。但是数字全息显微术采用的激光干涉系统复杂,而且对测量环境要求非常高,导致该技术未能在生物领域得到大规模应用。

相位恢复只需要记录光场通过物体后的衍射强度,通过迭代优化的方式实现定量相位成像。相位恢复最早由 Gerchberg-Saxton 于 20 世纪 60 年代提出,是广泛应用于高分辨显微成像的方法。但是,相位恢复很多时候存在收敛速度慢甚至不收敛的问题。为了改进相位恢复算法的收敛性,研究人员记录成像传播过程中的 2~3 个或者更多个平面的强度图像作为约束条件,结合计算机对光线传播的衍射过程进行模拟,最后迭代出物体的相位图像^[3-4]。但是迭代算法往往因迭代次数过多、抗噪能力差,无法满足相位成像的需求。2012 年,Polo 等^[5]创造性地将哈特曼传感器与相位恢复算法结合,用于测量波前像差。基于 Polo 等的研究,离焦型夏克-哈特曼传感器被提出,用于相位恢复和波前检测^[6]。离焦型夏克-哈特曼传感器虽然牺牲了一定的信噪比(SNR),但是记录的强度分布更丰富,更有利于相位恢复算法的迅速收敛。

本文在文献^[6]的基础上,提出了一种可用于相位物体观测和测量的定量相位成像技术。该技术利用离焦型夏克-哈特曼波前传感器记录两种不同波长的光的照射情况下光场通过相位物体后的衍射强度分布,利用双波长相位恢复算法进行迭代优化,从记录的强度分布中提取相位物体后的数字光场,实现相位物体的定量相位成像。数值模拟结果表明,该技术可以对相位物体进行定量相位成像。

2 基本原理

相位物体不改变入射光的振幅,只改变入射光的光程差,这会引入光场的相位变化。相位物体引起的相位变化和光程差的关系可以表示为

$$\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} w(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} n(x, y) d(x, y), \quad (1)$$

式中: x 为相位物体在 x 方向的坐标; y 为相位物体在 y 方向的坐标; λ 为透过相位物体的光的波长; $w(x, y)$ 为相位物体引入的光程差; $n(x, y)$ 为介质的折射率; $d(x, y)$ 为入射光通过介质的厚度。因此,传统相机无法实现对相位物体的成像,其结构必须通过定量测量相位物体引入的相位来获得。为表述方便,本文都采用光程差来表征相位。

2.1 离焦型夏克-哈特曼波前传感器

夏克-哈特曼波前传感器是目前使用最广泛的波前传感器之一,主要由微透镜阵列和位于微透镜阵列焦平面的探测器(一般为 CCD 或者 CMOS)两部分组成。微透镜阵列将入射波前分割成许多子波前,探测器记录不同子波前对应的光斑分布。通过计算每一个光斑相对于其对应参考点的质心平移,就可以获得子波前的斜率,即入射波前的局部倾斜,从而重构出入射波前^[7]。

区别于传统的夏克-哈特曼传感器,离焦型夏克-哈特曼传感器的探测器位于微透镜阵列的离焦面上,如图 1 所示。离焦型夏克-哈特曼传感器继承了传统夏克-哈特曼传感器将大畸变入射波前分割成小畸变子波前的微元处理方法,可以降低定量相位成像的难度,提高定量相位成像的精度和收敛速度^[8-9]。同时,离焦型夏克-哈特曼传感器在离焦面记录的强度分布更丰富,能够对光场的恢复提供更好的约束。需要注意的是,离焦型夏克-哈特曼传感器由于偏离焦面,在一定程度上会降低光斑的信噪比。但是,相位物体一般是透明的,对入射光没有吸收,不会改变入射光的强度,而且光斑的信噪比也可以通过增加照明来补偿,因此,离焦型夏克-哈特曼传感器应用于定量相位成像的优势是显而易见的。

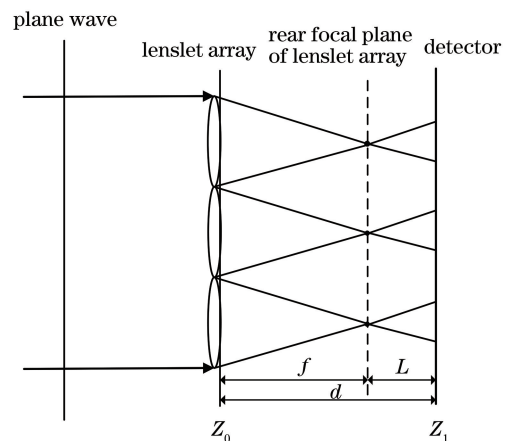


图 1 离焦型夏克-哈特曼波前传感器示意图

Fig. 1 Schematic of defocused Shack-Hartmann wavefront sensor

2.2 双波长相位恢复算法的基本原理

如图 1 所示,图中 f 为夏克-哈特曼传感器的焦距, L 为离焦距离。假设 Z_0 处的光程差为 $w_0(x, y)$,单位为 μm ,则该光程差在不同照明波长下引起的相位分布分别为 $\phi_{01}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_1} w_0(x, y)$, $\phi_{02}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_2} w_0(x, y)$,其中, λ_1 为第一个波长, λ_2 为第二个波长。考虑到相位物体不改变入射光场的

振幅,在不同波长的光的照射下,相位物体在 Z_0 处引起的复振幅分别可以表示为

$$U_{01}(x, y) = A \exp[i\phi_{01}(x, y)], \quad (2)$$

$$U_{02}(x, y) = A \exp[i\phi_{02}(x, y)], \quad (3)$$

式中: A 为均匀分布的振幅。

CCD 所在平面的复振幅可以由相位物体在 Z_0 处引起的复振幅经过角谱传播得到。在两种不同波长的光的照射下,角谱传播过程分别可表示为

$$U_{11}(x, y) = \text{FFT}^{-1} \{ \text{FFT}[U_{01}(x_0, y_0)] \exp[ik_1 d \sqrt{1 - (\lambda_1 f_x)^2 - (\lambda_1 f_y)^2}] \}, \quad (4)$$

$$U_{12}(x, y) = \text{FFT}^{-1} \{ \text{FFT}[U_{02}(x_0, y_0)] \exp[ik_2 d \sqrt{1 - (\lambda_2 f_x)^2 - (\lambda_2 f_y)^2}] \}, \quad (5)$$

式中: x_0 为相位物体在 Z_0 处的 x 轴坐标; y_0 为相位物体在 Z_0 处的 y 轴坐标;FFT 和 FFT^{-1} 分别为二维快速傅里叶变换及二维快速傅里叶逆变换; λ_1 、 λ_2 分别为两种照明波长; k_1 、 k_2 分别为两种波长的波数; $U_{11}(x, y)$ 和 $U_{12}(x, y)$ 分别为在两种照明下 Z_1 平面波的复振幅; d 为 Z_0 平面与 Z_1 平面之间的距离,即角谱传播的距离; f_x 、 f_y 分别为 x 方向和 y 方向上的空间频率。

相位恢复的评价函数 f_{EF} 定义为探测器获得的强度图像在每一个像素点的强度值与迭代计算获得的强度值的差的标准差,即

$$f_{\text{EF}} = \sqrt{\sum_{i,j} |I(x_i, y_j) - |U_N(x_i, y_j)|^2|^2}, \quad (6)$$

式中: $U_N(x_i, y_j)$ 为在 Z_1 平面计算得到的波的复振幅; $I(x_i, y_j)$ 为探测器测得的样品的衍射强度; N 为迭代次数; (x_i, y_j) 为像素点在探测器所在平面的坐标。 f_{EF} 数值越小,则恢复相位越接近真实相位。

双波长相位恢复通过对 Z_0 平面和 Z_1 平面的光场迭代优化实现^[10]。相位恢复的流程如图 2 所示,其中, I_{11} 、 I_{12} 分别代表 λ_1 、 λ_2 照射条件下探测器测得的衍射强度分布。首先,赋予 $U_{01}(x, y)$ 随机相位,波长为 λ_1 的光由 Z_0 平面向 Z_1 面进行菲涅耳衍射,运用(4)式分析菲涅耳衍射,得到 Z_1 平面的复振幅,保留其相位,并且用 $\sqrt{I_{11}}$ 替换振幅部分得到 $U_{11}(x, y)$,再将其逆向传播回 Z_0 平面。在 Z_0 平面处,首先要施加一个圆形光阑进行空间约束,然后将相位切换为第二个波长下的相位 [$\phi_{02}(x, y) = \phi_{01}(x, y) \times (\lambda_1/\lambda_2)$],光再从 Z_0 平面菲涅耳衍射到 Z_1 平面,根据(4)式得到衍射到 Z_1 平面的光强,

在 Z_1 平面用 $\sqrt{I_{12}}$ 替换复振幅的振幅部分,保留其相位,得到 $U_{12}(x, y)$ 再将其逆向传播到 Z_0 平面,在 Z_0 平面处再次利用光阑进行空间约束,将相位切换为第一个波长下的相位^[11]。重复上述步骤进行迭代,直到评价函数达到要求,最后输出待测的 $U_{01}(x, y)$ 。

需要注意的是,通过双波长相位恢复得到的相位是待测相位和微透镜相位的和,所以计算中需要将微透镜的相位减去,得到物体在 λ_1 波长光的照射条件下的相位分布。具体实施过程中,可以在没有相位物体的情况下记录不同波长的光的照射下的强度分布图,然后根据上述步骤,恢复出微透镜阵列的相位。

3 数值仿真

按照图 2 所示的装置图进行数值仿真。光纤激光器出射的激光经过光纤分束器(BS)后,被准直系统准直为平行光,将平行光照射到相位物体上,携带相位信息的物光经过显微物镜和准直透镜后,垂直入射到离焦型夏克-哈特曼传感器上,由探测器记录光场的强度分布,用于双波长相位恢复。图 3 为相位恢复流程图。需要注意的是,图 2 所示的光路中微透镜阵列所在平面和样品所在的物面共轭,具有完全相同的相位信息。微透镜阵列中的微透镜直径为 $200 \mu\text{m}$,微透镜阵列的焦距 $f = 18.8 \text{ mm}$,CCD 所在平面与微透镜阵列的距离 $d = 23.8 \text{ mm}$,即离焦量 $L = 5 \text{ mm}$ 。光源采用激光照明,两种激光波长的选择也很重要。波长间距不能太小,太小则在微透镜阵列后获得的衍射斑差别小,难以更快地迭代出相位,此时对探测器的灵敏度要求也更高;波长间距也不能太大,太大则微透镜对于两个波长的焦距

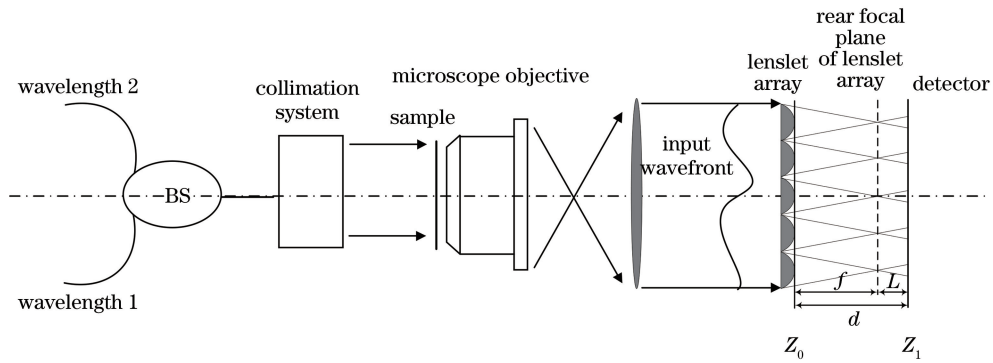


图 2 定量相位成像实验装置示意图

Fig. 2 Diagram of experimental setup for quantitative phase imaging

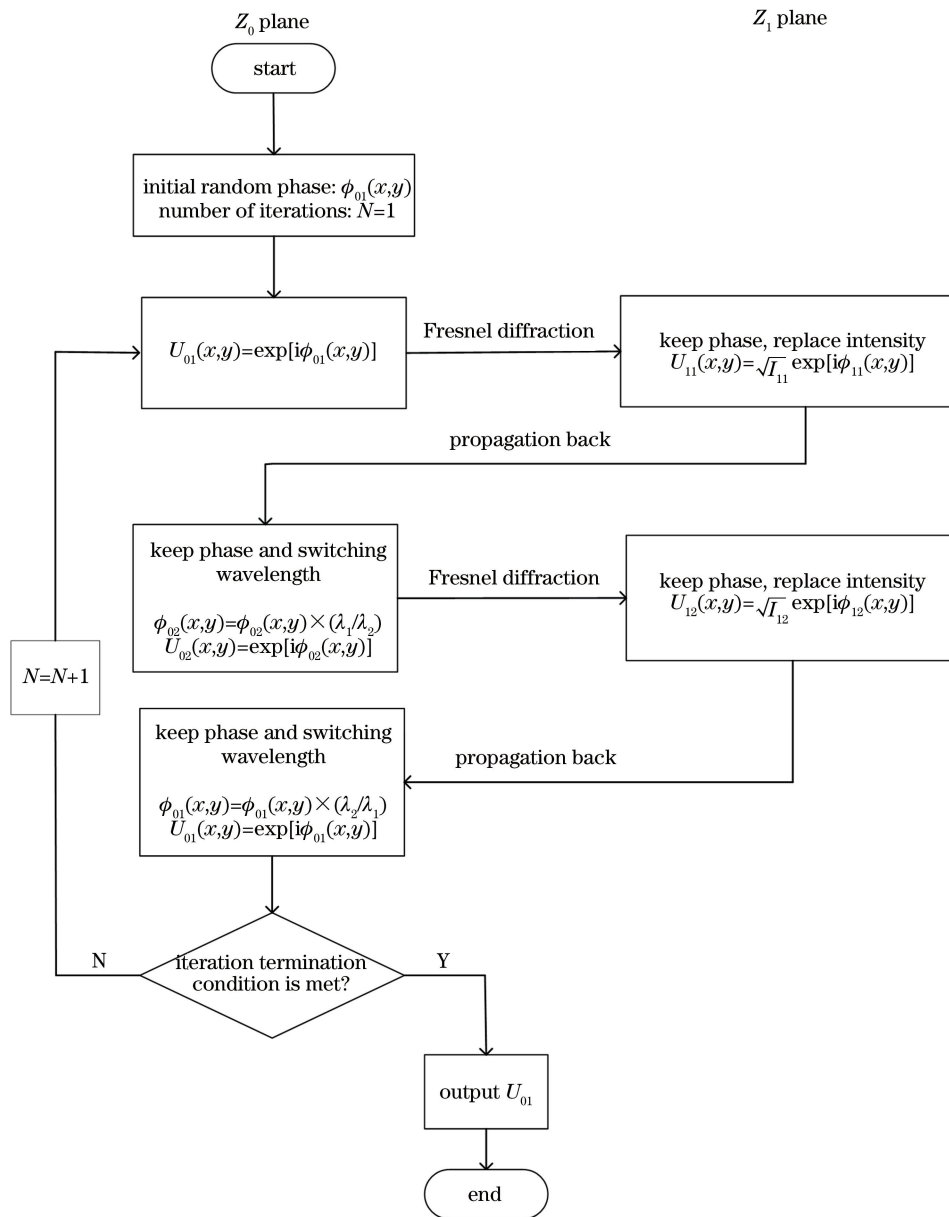


图 3 相位恢复流程图

Fig. 3 Phase retrieval flowchart

相差过大,不同波长下微透镜的焦距变化较大增加了实验的复杂度。依据上述的分析,本次数值模拟选择的照明波长分别为 $\lambda_1 = 0.640 \mu\text{m}$ 和 $\lambda_2 = 0.685 \mu\text{m}$, 波长间距为 $0.045 \mu\text{m}$ 。迭代终止条件是归一化的评价函数的值小于 8×10^{-5} 。

根据第 2 节阐述的双波长相位恢复的基本原理,分别对不同的相位物体进行定量相位成像,所有程序皆在 Matlab 软件中编写。

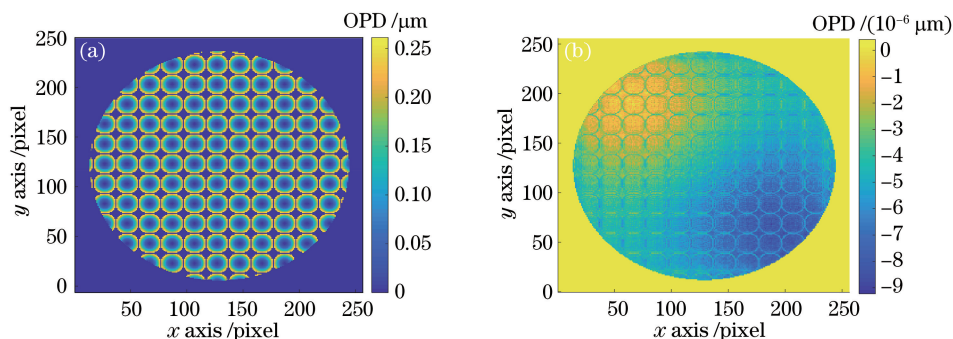


图 4 微透镜阵列的光程差。(a) 相位成像的结果;(b) 理论计算值与相位成像结果的差值

Fig. 4 Optical path difference of microlens array. (a) Result of phase imaging; (b) difference between theoretical value and phase imaging result

放入相位物体后,相位成像的结果是相位物体的相位和微透镜的相位之和,相位物体的相位可以通过将相位成像结果减去微透镜阵列的相位得到。

3.2 相位屏

相位屏通过改变各点的刻蚀高度引入光程差。

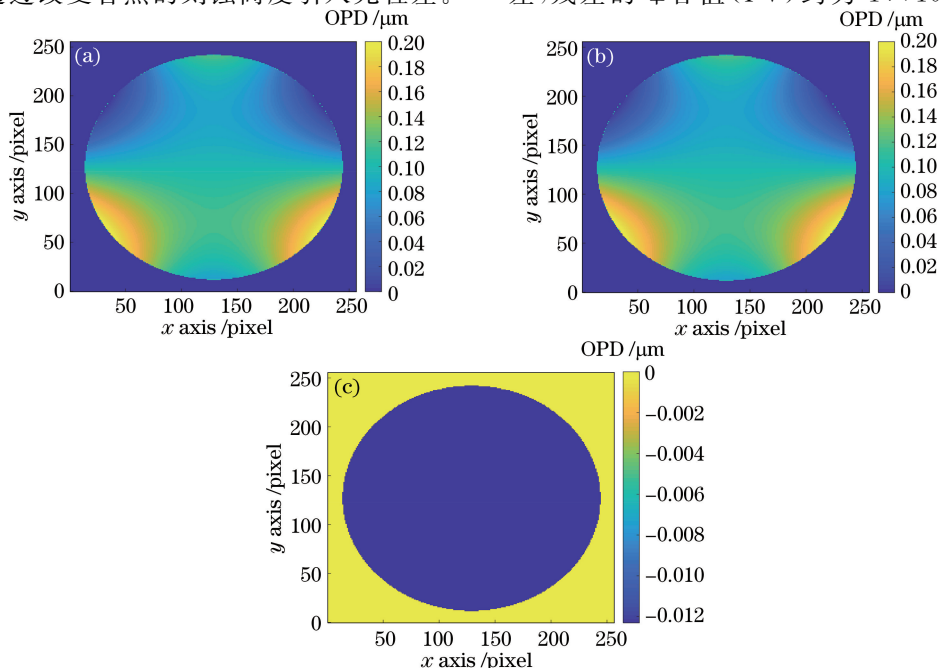


图 5 相位屏的相位成像结果。(a) 输入光程差;(b) 相位成像的光程差;(c) 残差

Fig. 5 Phase imaging results of phase screen. (a) Input optical path difference; (b) optical path difference of phase imaging; (c) residual error

3.1 微透镜阵列

不放置相位物体时,通过对记录的光斑强度进行定量相位成像,可以得到微透镜阵列引入的光程差(OPD)。图 4(a)所示为采用微透镜阵列进行相位成像得到的光程差,图 4(b)为微透镜阵列光程差的理论计算值与相位成像光程差的差值。显然,相位成像的结果和理论计算结果吻合得很好。

图 5(a)所示为相位屏引入的光程差分布图,最大光程差为 $0.2 \mu\text{m}$,相当于 λ_1 的 $0 \sim 0.3$ 个波长。在波长为 λ_1 的光的照射下相位范围为 $0 \sim 0.3$ 个波长。图 5(b)所示为相位成像得到的光程差,图 5(c)为残差,残差的峰谷值(PV)约为 $1 \times 10^{-5} \mu\text{m}$,均方根

(RMS) 值约为 $1.7 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ 。

图 6 所示为相位屏在定量相位成像过程中,归一化的评价函数随着迭代次数的变化。从图 6 可以

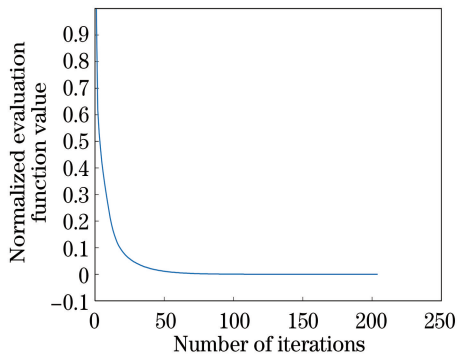


图 6 评价函数曲线

Fig. 6 Curve of evaluation function

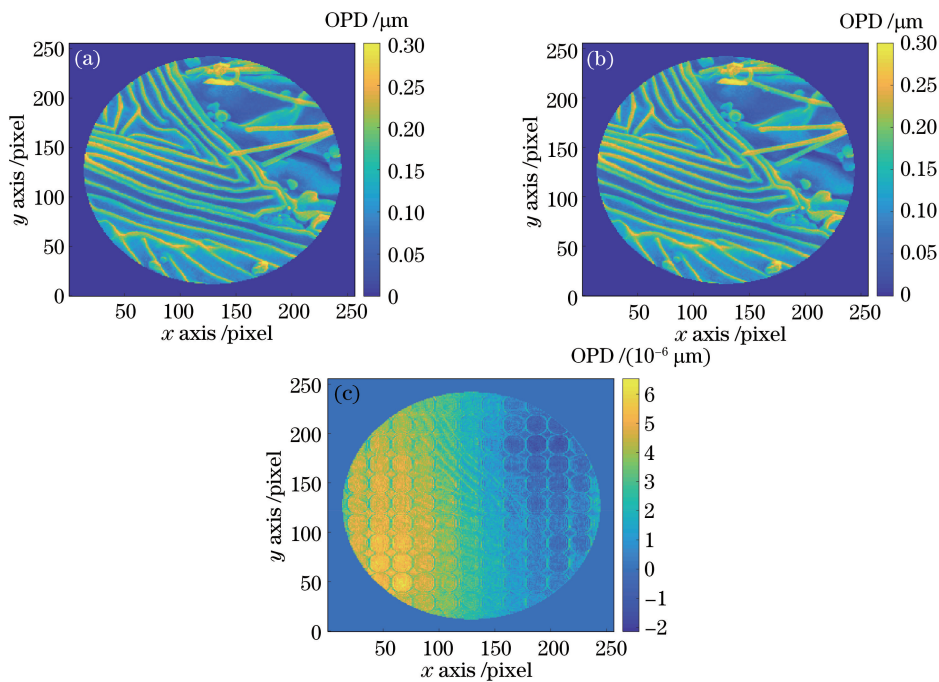


图 7 相位物体的相位成像结果。(a)物体引入的光程差;(b)利用相位成像获得的光程差;(c)残差

Fig. 7 Phase imaging results of phase objects. (a) Optical path difference caused by object; (b) optical path difference obtained by phase imaging; (c) residual error

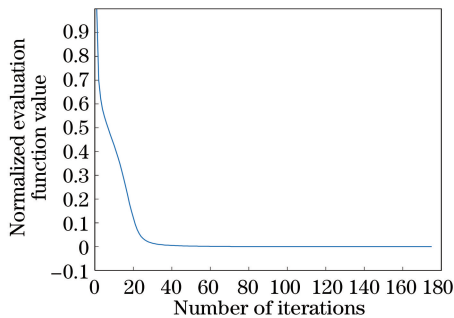


图 8 评价函数曲线

Fig. 8 Curve of evaluation function

看出,在迭代 200 次后,评价函数曲线已经达到迭代终止条件,这说明这时恢复相位已经十分接近输入相位。

3.3 相位物体

相位物体引入的光程差由物体的折射率和物体的厚度共同决定。图 7(a)中相位物体的最大光程差为 $0.3 \mu\text{m}$,相位范围相当于 λ_1 的 $0 \sim 0.45$ 个波长。相位分布在 $0 \sim 0.45$ 个波长之间。相位成像结果如图 7(b)、(c)所示。从相位成像结果可以看出,恢复相位与原相位的误差为 $10^{-6} \mu\text{m}$ 量级,基本可以认为恢复光程差与输入光程差是一致的。图 8 是评价函数的变化曲线,图 8 中评价函数在不到 200 次迭代后已经跳出循环,也可以看出本文提出的方法在对相位物体成像时很快收敛。

3.4 光栅

光场经过刻蚀光栅后,可将光栅的刻蚀高度转为光程差,因此,本文提出的定量相位成像方法可以应用于对光栅等的精密检测。接下来以光栅的刻蚀高度为例进行测量。光栅高度引起的光程差为 $0.160 \mu\text{m}$ 。相位成像结果如图 9 所示。图 10 则展示了光栅相位恢复的评价函数曲线。

由图 9 可以看出,该方法可以精确地测量光栅引入的光程差,在已知材料折射率的情况下,可以精确地给出光栅的刻蚀高度。图 10 显示,针对光栅的

相位成像在双波长相位恢复中收敛速度明显变慢,迭代次数也迅速增加。这主要是由于光栅的非连续结构造成的。对于非连续相位,传统的相位恢复算

法几乎是不收敛的。本文中提出的相位成像技术在结构和算法上都对光场的传播施加了约束条件,保证了算法的收敛。

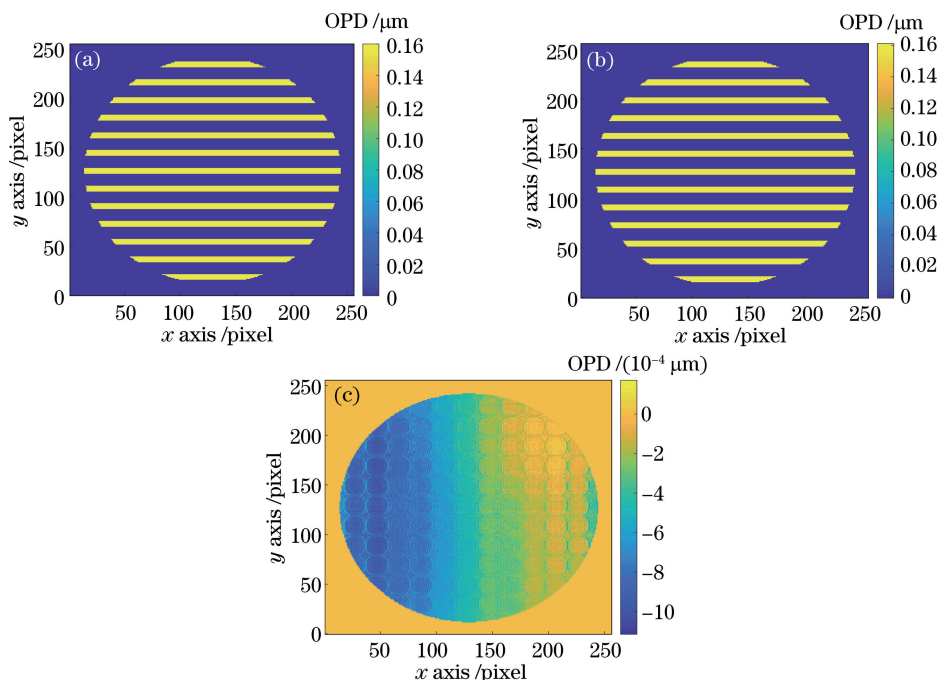


图 9 光栅的相位成像结果。(a)输入的光程差;(b)采用相位成像得到的光程差;(c)残差

Fig. 9 Phase imaging results of grating. (a) Input optical path difference; (b) optical path difference of phase imaging; (c) residual error

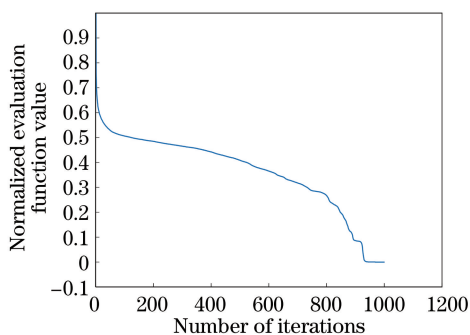


图 10 评价函数曲线

Fig. 10 Curve of evaluation function

综上所述,本文提出的相位成像技术可以对不同类型的相位物体实现定量相位成像。

4 分析与讨论

算法的收敛性和抗噪性是相位恢复算法的重要特性,直接决定了算法用于实际相位成像的可行性。本节主要围绕所提相位成像技术的收敛性和抗噪性展开讨论。

4.1 算法的收敛性

相比于传统的基于相位恢复的定量相位成像算法,本文所提出的定量相位成像技术进行了三个方

面的改进:1)通过采用微透镜阵列分割波前,使入射到每个微透镜上的子波前大幅度减小,提高了相位恢复算法的精度和收敛速度;2)记录两个波长下的强度分布,尽量避免相位恢复中的多解和停滞问题;3)采用离焦型夏克-哈特曼传感器记录离焦面上的强度分布。

为了对比各种算法的收敛性,分别用离焦型夏克-哈特曼传感器记录双波长照明下的强度分布、传统夏克-哈特曼传感器记录双波长照明下的强度分布、传统相机记录双波长照明下的强度分布(不使用微透镜阵列)和离焦型夏克-哈特曼传感器记录单一波长照明下的强度分布,对 3.2 节中的相位物体进行定量相位成像。为了表述方便,分别将这 4 种情况简记为 C1, C2, C3 和 C4。数值仿真的参数以及迭代终止条件和第 3 节完全一致,离焦量仍然是 5 mm。程序全部运行在 CPU 型号为 Intel Core i5-9400F 的计算机上。

图 11 所示为 C1, C2, C3 和 C4 4 种情况下,评价函数随迭代次数的变化曲线,其中 C1, C2 的迭代次数与 C3, C4 差距过大,故将这 4 个曲线放置在两张图中,以便更加清晰地展示这 4 种情况各自的性能。

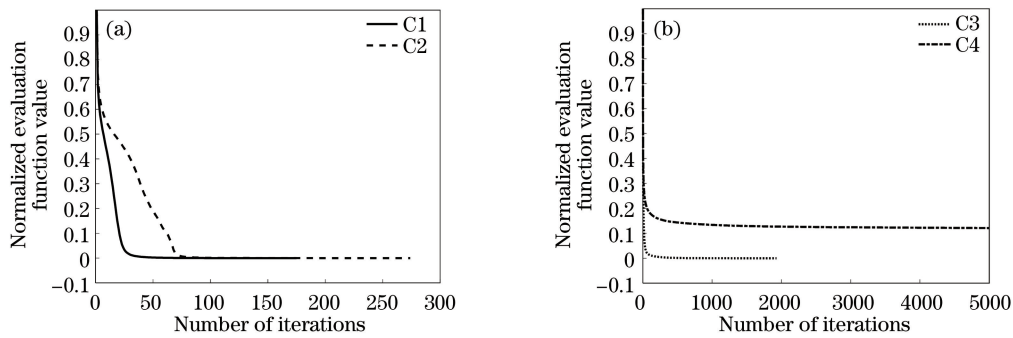


图 11 评价函数曲线。(a) C1 和 C2; (b) C3 和 C4

Fig. 11 Evaluation function curves. (a) C1 and C2; (b) C3 and C4

图 11(a)中实线 C1 是使用本文提出的双波长、基于离焦型夏克-哈特曼传感器的方法进行相位成像得到的评价函数曲线,评价函数经过 175 次迭代,耗时 3.76 s 就达到终止条件,跳出循环;虚线 C2 代表的是将 CCD 放置在微透镜阵列的焦面上的情况,评价函数经过 274 次迭代,耗时 5.82 s 跳出迭代过程;图 11(b)中点线 C3 表示的是未使用微透镜阵列,而将物波直接照射到 CCD 上的情况,该方法经过 1928 次迭代,耗时 38.05 s 才达到终止条件;点划线 C4 则是单波长相位恢复的评价函数曲线,单波长的条件下数值模拟在经过了 5000 次迭代后仍未达到迭代终止条件。

由上面的结果可以看出:本文提出的定量相位成像技术大大提高了收敛速度,大幅度减少了迭代次数,缩短了相位成像所需要的时间。这主要得益于微透镜阵列的使用。微透镜将入射波前分割成许多子波前,大幅度减小了每个微透镜上的波前畸变,使相位恢复得以快速收敛。同时可以发现,记录双波长照明下的强度分布和在离焦面记录强度分布都增加了相位恢复的约束条件,使得相位恢复结果更接近真实的相位优化结果。

此外,采用离焦面上的强度分布进行相位成像,与采用焦面上记录的强度分布进行相位成像相比,收敛速度没有特别大的提升。这主要是因为微透镜个数较多的情况下,分割到每个微透镜上的子波前已经非常小,在焦面上和离焦面上的强度分布相差不大,在离焦面上进行强度记录的优势没有凸显出来,这导致了收敛速度提升有限。

4.2 抗噪性

通过采用离焦型夏克-哈特曼传感器记录光场强度分布,一定程度上降低了图像的信噪比,因此,

基于离焦型夏克-哈特曼传感器的定量相位成像技术必须具有一定的抗噪性。模拟仿真中,通过在获得的强度分布图像中加入高斯白噪声,估算定量相位成像的精度,用于检验该方法的抗噪能力。相位物体依然为图 7 所采用的弱相位物体。在计算机模拟中加入高斯白噪声的影响,在信噪比分别为 20 dB、30 dB、40 dB 的条件下,分别计算出这三种情况下相位成像的结果与输入相位物体光程差的标准差。实验结果如图 12 和表 1 所示。

图 12 展示了信噪比分别为 20 dB、30 dB、40 dB 的情况下,相位物体的定量相位成像结果。图 12 中的左侧是不同信噪比情况下相位成像的光程差,右侧是不同信噪比情况下的残差。与图 7 相比较,图 12 中因噪声的引入,残差明显增大。

表 1 不同信噪比情况下相位成像的误差

Table 1 Error of phase imaging under different SNR

SNR / dB	Error / μm
20	3.320×10^{-2}
30	2.800×10^{-3}
40	3.000×10^{-4}

表 1 中显示,当信噪比为 20 dB 时,误差为 $3.320 \times 10^{-2} \mu\text{m}$,物体的高度为 $0.3 \mu\text{m}$ 时误差达到了物体厚度的 10% 左右。虽然噪声对定量相位成像精度有一定的影响,但是测量结果表明采用该方法进行定量相位成像依然是可行的;当信噪比达到 30 dB 时,将只有 $2.800 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ 的误差,误差为样品高度的 1% 左右,几乎可以忽略不计。因此,采用本文提出的方法进行定量相位成像,得到的图像的信噪比不低于 20 dB,最高信噪比优于 30 dB。由此可见,为实现实际应用,还需进一步提升该技术的抗噪性。

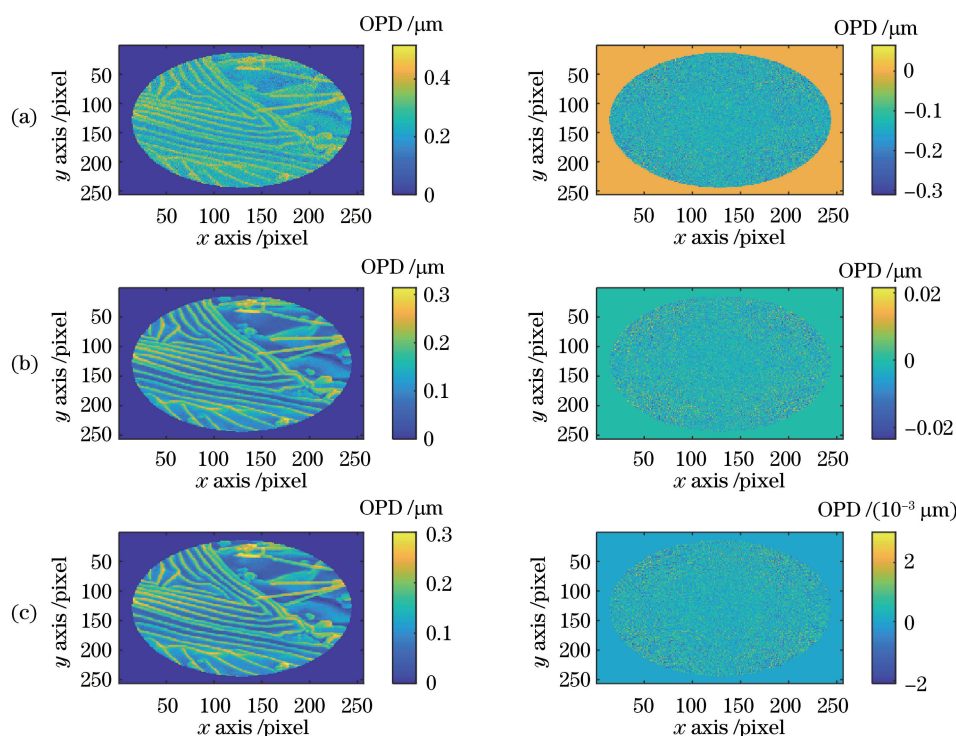


图 12 不同信噪比条件下相位物体成像的光程差和残差。(a) 20 dB; (b) 30 dB; (c) 40 dB
Fig. 12 Optical path difference and residual error of phase object imaging under different SNR.
(a) 20 dB; (b) 30 dB; (c) 40 dB

5 结 论

提出了一种基于离焦型夏克-哈特曼传感器的定量相位成像技术。该技术通过采用微透镜阵列分割入射波前、双波长照明、在离焦面上记录强度分布三个方面的改进,为相位恢复过程提供了更多的信息,减小了迭代算法的解的不确定性,提高了相位恢复算法对光场传播的约束,保证了算法的精度和收敛速度。利用数字仿真检验了该技术分别对相位屏、弱相位物体和刻蚀光栅等不同类型相位物体的相位成像精度,结果表明该技术是一种收敛速度快、成像精度高的相位成像技术。该技术具有应用在显微领域并对透明细胞实现非接触成像的巨大潜力;同时,该方法还可以应用于精密检测领域,完成对微小厚度的测量。

参 考 文 献

- [1] Zhang J L, Chen Q, Zhang X Y, et al. Lens-free on-chip microscopy: theory, advances, and applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0603009.
张佳琳, 陈钱, 张翔宇, 等. 无透镜片上显微成像技术: 理论、发展与应用 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(6): 0603009.
- [2] Fan J P, Zhang D S, Lü X X, et al. Phase reconstruction and compensation of biological cell with digital holographic microscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0209019.
范金坪, 张德思, 吕晓旭, 等. 数字全息显微术用于生物细胞相位重构与补偿的研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209019.
- [3] Zalevsky Z, Mendlovic D, Dorsch R G. Gerchberg-Saxton algorithm applied in the fractional Fourier or the Fresnel domain [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(12): 842-844.
- [4] Yang G Z, Dong B Z, Gu B Y, et al. Gerchberg-Saxton and Yang-Gu algorithms for phase retrieval in a nonunitary transform system: a comparison [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(2): 209-218.
- [5] Polo A, Kutchoukov V, Bociort F, et al. Determination of wavefront structure for a Hartmann wavefront sensor using a phase-retrieval method [J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7822-7832.
- [6] Li C W, Li B M, Zhang S J. Phase retrieval using a modified Shack-Hartmann wavefront sensor with defocus [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(4): 618-624.
- [7] Li S, Zhang S J, Li C W. Understanding optical systems through theory and case studies [M]. New York: SPIE, 2017.
- [8] Yazdani R, Fallah H. Wavefront sensing for a Shack-Hartmann sensor using phase retrieval based on a

sequence of intensity patterns [J]. Applied Optics, 2017, 56(5): 1358-1364.

- [9] Feng F, Li C W, Zhang S J. Wavefront reconstruction by a defocused Shack-Hartmann sensor based on moment of spot [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0628001.
 丰帆, 李常伟, 张思炯. 离焦型 Shack-Hartmann 传感器的光斑矩波前重建 [J]. 光学学报, 2018, 38

(6): 0628001.

- [10] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. Applied Optics, 1982, 21(15): 2758-2769.
 [11] Noom D W E, Eikema K S E, Witte S. Lensless phase contrast microscopy based on multiwavelength Fresnel diffraction [J]. Optics Letters, 2014, 39(2): 193-196.