

光学学报

基于波面分割及多平面相位恢复的定量相位成像技术

桂博瀚^{1,2,3}, 李常伟^{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, 北京 100049

摘要 提出了一种基于微透镜阵列分割波前及多平面相位恢复的定量相位成像技术。针对大动态范围的相位物体实现定量相位成像,该技术同时施加了横向波面分割、轴向多衍射平面和多波长照明三种约束。该技术记录了两种不同波长照明下,微透镜阵列焦面附近不同衍射距离的强度分布图,采用多平面相位恢复算法提取透过相位物体的数字复振幅光场,通过双波长数字复振幅光场相位提取算法,实现了大动态范围下的相位物体成像。数字仿真实验中,在 640 nm 和 685 nm 的照明下,对相位变化范围大、结构复杂的相位物体进行了模拟仿真,结果表明,该技术可以高效、便捷地实现高精度相位成像。

关键词 成像系统; 多平面相位恢复; 双波长; 微透镜阵列; 定量相位成像

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230451

1 引言

光波的相位携带物体的重要结构信息。而现有的探测器只能测量光场的强度分布,相位信息在探测过程中因无法直接获得而丢失。对于生命科学中的活体细胞等透明相位物体,由于只改变了透过光场的相位信息,探测器无法直接获得相位物体的结构信息。相衬显微镜可以将物体的相位信息转为强度信息,进而通过探测器获得物体的结构,但是只能定性观测,无法进行定量测量,而且仅适用于动态范围小的相位物体。定量相位成像技术就是面向透明相位物体进行定量测量的一种技术。定量相位成像技术根据原理的不同可大致分为干涉式和非干涉式。以数字全息显微术^[1-2]为代表的干涉式方法利用光波的干涉叠加来获取光波的相位信息。其优势在于其测量精度高、稳定性好,但是干涉法对环境非常敏感。反之,与干涉方法相比,非干涉方法将光学结构上的复杂度转换为算法计算上的复杂度,因其实验装置相对简单、受外界环境影响较小而被广泛应用。目前,非干涉测量相位的方法主要有波前传感器、光强传输方程(TIE)^[3-5]、相位迭代恢复^[6-7]三种。其中,波前传感器适用于低频相位的实时测量,不适用于分辨率要求较高的定量相位成像。TIE通过数值求解光强传输方程可直接获取相位信

息,不需要任何迭代过程,相比于其他方法而言,计算简单、无需相位解包裹、无需复杂的光学系统及苛刻的实验条件。但缺点同样明显,需要苛刻的边界条件,重构的相位精度难以兼顾低频和低频部分^[8]。与之相比,相位迭代恢复由于结构简单、精度高,广泛应用在科学和工程的各个领域,包括天文成像^[9]、波前传感^[10]和超分辨率成像^[11]等领域。

相位恢复通过在测量平面和样本平面之间施加不同的约束条件来重建样本的复振幅。相位恢复最早由 Gerchberg 和 Saxton^[12]提出,用于高分辨显微成像,即 Gerchberg-Saxton(GS)算法。其思想是,在物体和傅里叶平面上应用振幅约束,通过迭代优化恢复相位。之后,Fienup^[13]优化了GS算法,在对象平面中采用有限支持和非负约束,提出了误差减少算法(ER)和混合输入输出(HIO)算法^[14]。在实践中,由于测量噪声的存在,这些仅使用一个或两个强度测量的迭代方案很容易陷入收敛、停滞和不确定性等问题^[15]。其中一种解决方法是记录不同传播平面上的一组强度分布,例如单光束多强度重建(SBMIR)算法^[16-17]和多阶段(Multi-stage)算法^[18]。研究人员记录光波在传播过程中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。但是迭代算法往往因迭代次数过多、收敛速

收稿日期: 2023-01-09; 修回日期: 2023-02-23; 录用日期: 2023-04-10; 网络首发日期: 2023-04-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11873069)

通信作者: *cqli@niaot.ac.cn

度慢,无法满足相位恢复的需求。而基于算法的计算成像领域的多孔径光学^[19]是一种能有效减少迭代出错、提高收敛速度的方案,代表性的例子就是微透镜阵列^[10,20]。虽然使用多孔径光学元件可以提高相位恢复收敛速度^[21],但是测量的动态范围十分有限。

为了保证收敛速度的同时,提高定量相位成像技术的动态测量范围,本文提出了一种基于波面分割及轴向多平面相位恢复的定量相位成像技术。该技术利用微透镜阵列将入射波前分割为子波前,通过在微透镜阵列焦面附近的多个位置记录两种不同波长的光照强度分布,利用多平面相位恢复算法进行迭代优化,提取相位物体后的数字复振幅光场,实现大动态范围的定量相位成像。仿真实验结果表明,该技术能快速收敛,并能实现高精度的大动态范围的定量相位成像。

2 基本原理

2.1 基于波面分割及多平面相位恢复的定量相位成像

为了提高定量相位成像的动态范围,必须增加相位恢复的约束,因此,将探测器分别置于微透镜阵列的焦面和离焦面多个衍射平面上^[22],共计4个测量平面,如图1所示。其中 f 是微透镜阵列的焦距, L_k 是离焦距离, d_k 是衍射距离,微透镜阵列后紧贴微透镜阵列的平面称为输入面 Z_0 ,将探测器所在平面合称为 $Z_k(k=1,2,3,4)$ 。通过横向的波面孔径分割、轴向选取焦面和离焦面多个衍射平面,以及多波长照明三种约束,可以提高相位恢复的精度和收敛速度,同时,微透镜阵列在离焦面记录的强度分布信息更丰富,能够对相位的恢复提供更好的约束。

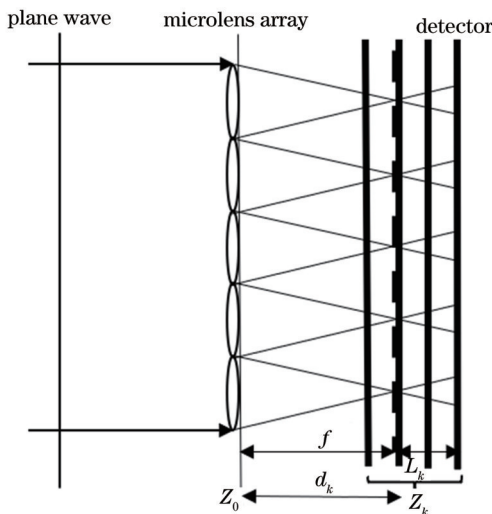


图1 基于波面孔径分割及多平面相位恢复的定量相位成像示意图

Fig. 1 Schematic of quantitative phase imaging based on wavefront aperture segmentation and multiplane phase retrieval

2.2 定量相位成像恢复算法

本文提出的多平面相位恢复算法示意图如图2所示,具体步骤如下:

1) 在单波长 λ 的照明条件下,在输入面 Z_0 处输入光瞳 $T(x_0, y_0)$ 的预估初相位 $\varphi_0(x_0, y_0)$,此处的预估值赋予成全零相位。输入的光场可以表示为

$$E_0(x_0, y_0) = T(x_0, y_0) \times \exp[i\varphi_0(x_0, y_0)]. \quad (1)$$

2) 将 $E_0(x, y)$ 传播到目标衍射面 Z_k ,此处的复振幅可以表示为

$$G_{k,n}(x, y) = F\{E_0(x_0, y_0), d_k\} = A_{k,n} \exp[i\phi_{k,n}(x, y)], \quad (2)$$

式中: x_0 和 y_0 是入射光场在 Z_0 处的坐标; F 表示菲涅耳衍射传播算子;下标 n 表示该算法的第 n 次迭代;下标 k 表示第 k 个衍射平面($k=1,2,3,4$),即CCD收集衍射强度的位置; $A_{k,n}$ 和 $\phi_{k,n}$ 分别表示算法的第 n 次迭代的第 k 个衍射平面的模量和相位。

3) 用CCD记录的测量强度的平方根 $\sqrt{I_k}$ 代替 $A_{k,n}$,并保持相位不变,第 k 个衍射平面的复振幅可表示为

$$G_{k,n}(x, y) = \sqrt{I_k} \exp[i\phi_{k,n}(x, y)]. \quad (3)$$

4) 将 $G_{k,n}(x, y)$ 逆向传播到 Z_0 ,复振幅可表示为

$$E_{0,n}(x, y) = F^{-1}\{G_{k,n}(x, y), d_k\} = A'_{0,n} \exp[i\phi'_{0,n}(x_0, y_0)], \quad (4)$$

式中, F^{-1} 表示逆菲涅耳衍射传播算子。

5) 施加空间约束,重复上述操作,直到满足迭代停止条件。将迭代停止条件也即评价函数 E_r 定义为探测器实际测得的衍射强度图在每一个像素点的强度值与迭代算法计算得到的强度值的均方根误差(RMSE),即

$$E_r = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} |I_k(x_i, y_j) - |G_{k,n}(x_i, y_j)|^2|^2}{N \times N}}, \quad (5)$$

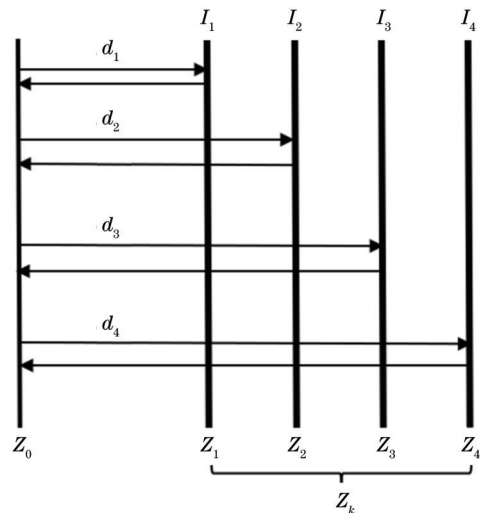


图2 多平面相位恢复示意图

Fig. 2 Schematic of multiplane phase retrieval

式中： $G_{k,n}(x_i, y_j)$ 为衍射平面计算得到的复振幅； $I_k(x_i, y_j)$ 为探测器测得的样品的衍射强度； $N \times N$ 为图像像素个数； (x_i, y_j) 为像素点在探测器平面上的坐标。 E_r 的数值越小，恢复的相位就越接近真实的输入相位。迭代终止条件是评价函数的值小于 1×10^{-4} 。

对于单个波长而言，由于激光等相干光源的波长范围通常为几百纳米到几微米，当光波照射被测物体后形成的光程差大于一个波长时，目标光场的真实相位区间将大于 $[-\pi, \pi]$ 。但由于反正切函数的周期性，使得数值重建后的相位都被折叠在主值相位 $[-\pi, \pi]$ 中间，因此需解开相位包裹以获得真正的相位信息。光场的相位变化和光程差的关系可以表示为

$$\varphi(x, y) = 2\pi/\lambda \Delta(x, y), \quad (6)$$

式中： x 和 y 是相位物体分别在 x 方向和 y 方向的坐标； λ 为入射光波长； $\Delta(x, y)$ 为光程差，单位为 m。对于同一光程差分布，相位分布和入射波长成反比。因此，可以利用双波长解开相位包裹^[23]。双波长解包裹法的核心就是用两个小波长 λ_1 和 λ_2 等效一个大波长 λ_Λ ，如下式所示：

$$\frac{1}{\lambda_\Lambda} = \left| \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right|. \quad (7)$$

等效波长比这两个波长都要大很多，可以重建获得原本的光程差。单个波长会让算法的可检测和恢复范围受到限制，为让算法获得更大的动态范围，本文采用双波长进行相位恢复。图 3 显示了完整的双波长多平面相位恢复的流程，若在 λ_1 和 λ_2 照明下，输入面 Z_0 处的

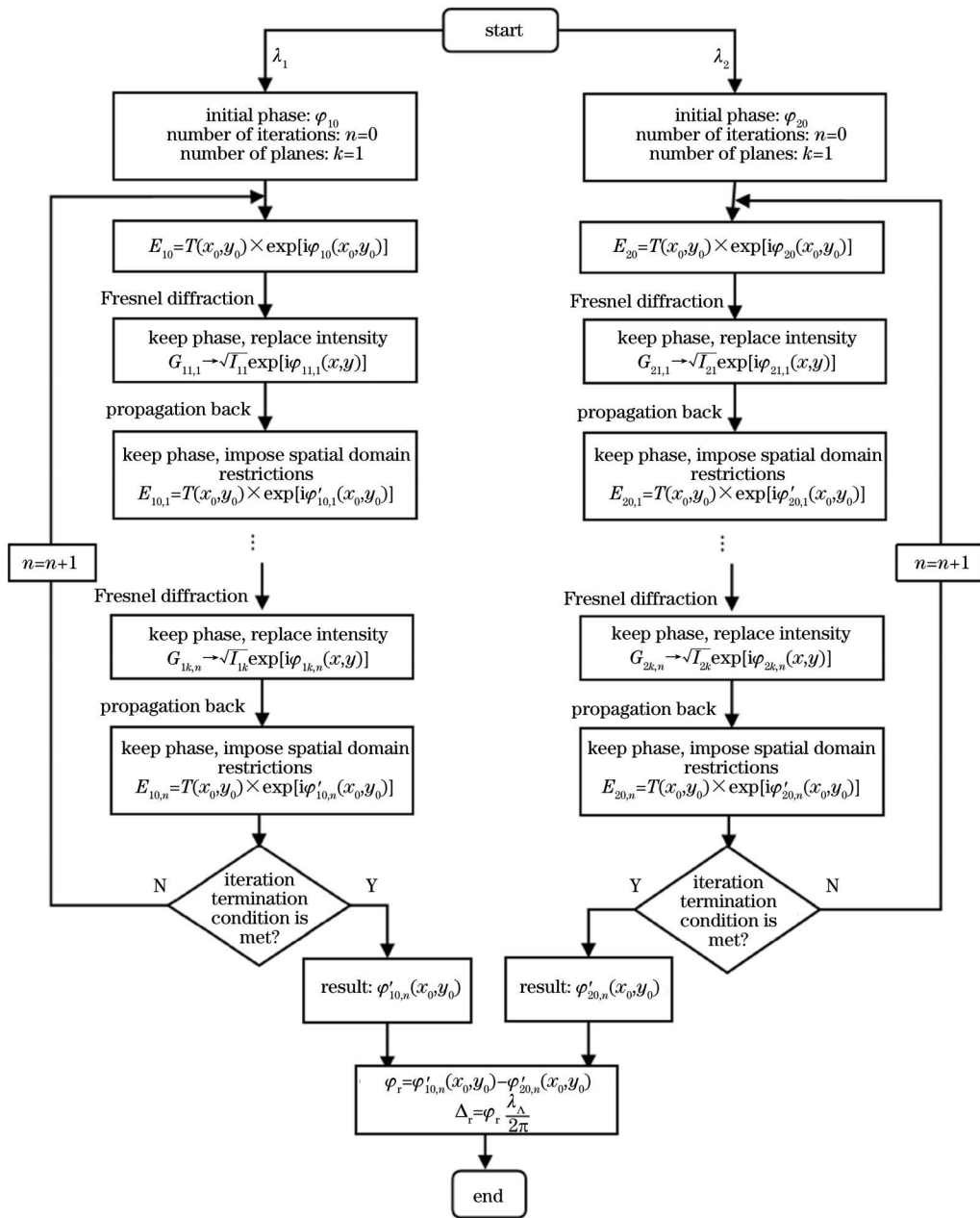


图 3 相位恢复流程图

Fig. 3 Flow chart of phase retrieval

相位分布分别为

$$\varphi_{10}(x_0, y_0) = \frac{2\pi}{\lambda_1} \Delta(x_0, y_0), \quad (8)$$

$$\varphi_{20}(x_0, y_0) = \frac{2\pi}{\lambda_2} \Delta(x_0, y_0), \quad (9)$$

其复振幅可以分别表示为

$$E_{10} = T(x_0, y_0) \times \exp[i\varphi_{10}(x_0, y_0)], \quad (10)$$

$$E_{20} = T(x_0, y_0) \times \exp[i\varphi_{20}(x_0, y_0)]. \quad (11)$$

因此, CCD 所在的多个衍射平面 $Z_k (k=1, 2, 3, 4)$ 的复振幅可分别表示为

$$G_{1k,n}(x, y) = F\{E_{10}(x_0, y_0), d_k\} = A_{1k,n} \exp[i\phi_{1k,n}(x, y)], \quad (12)$$

$$G_{2k,n}(x, y) = F\{E_{20}(x_0, y_0), d_k\} = A_{2k,n} \exp[i\phi_{2k,n}(x, y)]. \quad (13)$$

用 CCD 记录的测量强度代替模量并保持相位不变, 第 k 个衍射面的复振幅可表示为

$$G_{1k,n}(x, y) = \sqrt{I_{1k}} \exp[i\phi_{1k,n}(x, y)], \quad (14)$$

$$G_{2k,n}(x, y) = \sqrt{I_{2k}} \exp[i\phi_{2k,n}(x, y)], \quad (15)$$

式中: $\varphi_{10}(x_0, y_0)$ 、 $\varphi_{20}(x_0, y_0)$ 和 $E_{10}(x_0, y_0)$ 、 $E_{20}(x_0, y_0)$ 分别代表在 λ_1 和 λ_2 入射条件下的初始相位和入射光场; $G_{1k,n}(x, y)$ 、 $G_{2k,n}(x, y)$ 分别代表在 λ_1 和 λ_2 入射条件下的第 n 次迭代各个衍射面上的复振幅; $A_{1k,n}$ 、 $A_{2k,n}$ 和 $\phi_{1k,n}(x, y)$ 、 $\phi_{2k,n}(x, y)$ 分别代表在 λ_1 和 λ_2 入射条件下第 n 次迭代各个衍射面上的模量和相位; I_{1k} 、 I_{2k} 分别代表在 λ_1 和 λ_2 入射条件下, 探测器在各个衍射面上探测到的衍射强度分布。

再次强调, 整个相位恢复的流程是分波长进行的。对于两个波长取出其经过 n 次迭代后符合收敛条件的相位 $\varphi'_{10,n}(x_0, y_0)$ 和 $\varphi'_{20,n}(x_0, y_0)$, 最后将两个相位作差得到 φ_r , 以合成波长 λ_n 反推出光程差的分布 Δ_r , 即为所求的相位物体引入的光程差。另外请注意, 每一次参与迭代优化的相位都是包含所有子孔径相位的整体相位, 因此, 最后相位恢复的输出也是所有子孔径相位的整体输出。

3 模拟仿真

数值仿真的实验装置示意图如图 4 所示。激光器是 Coherent 公司的半导体二极管激光器, 波长分别为 640 nm 和 685 nm 的两个激光器的输出光耦合到光纤中作为光源, 实现不同波长下的照明。激光器调制到 λ_1 , 出射的激光束经过分束器 (BS) 后, 经准直系统准直为平行光。准直后的平行光照射在透明的相位物体上, 不改变光强, 只携带相位信息。光束经过缩束后, 垂直入射到微透镜阵列上, 移动探测器分别记录多个位置的光场强度分布, 进行 λ_1 照明下的多平面相位恢复。随后调制激光器转换到 λ_2 , 再次移动探测器分别记录相同的多个位置的光场强度分布, 进行 λ_2 照明下的多平面相位恢复。最后将得到的两个包裹相位进行双波长解包裹, 就能得到重建结果。微透镜阵列中的单个微透镜直径为 130 μm , 微透镜阵列单个微透镜的焦距 $f=20$ mm。CCD 在 4 个等间隔的平面上采集光场强度分布, 模拟的采集平面大小为 256 pixel \times 256 pixel, CCD 所在的 4 个平面与微透镜阵列的距离分别为 18、19、20、21 mm。

本文中数值模拟选择的照明波长分别为 $\lambda_1=640$ nm 和 $\lambda_2=685$ nm, 波长间距为 45 nm, 均在可见光范围内。实验中选择激光波长间距不宜太大, 否则由于微透镜阵列材料对两个波长的折射率不同, 会导致不同波长下微透镜阵列焦距明显不同, 无疑会增加实验和算法的复杂度; 其次, 波长间距过大也会导致合成波长太短, 不够满足大动态范围下定量相位成像的要求。同样地, 衍射距离间隔的设置也不能过大或过小。间隔过大会导致 CCD 采集的图像的信噪比 (SNR) 不高, 影响相位恢复的效果; 间隔过小会导致相邻图像的差别太小, 对实验的采集设备要求过高。此外, 还要考虑实验中位移平台的调整及其重复精度对相位恢复精度的影响。根据实验原理, 下面分别对动态范围大、复杂度不同的相位物体波前进行数值仿真实验, 检验所提方法的性能。程序全部在 CPU 型号为 Intel Core i5-9400F 的计算机上运行。

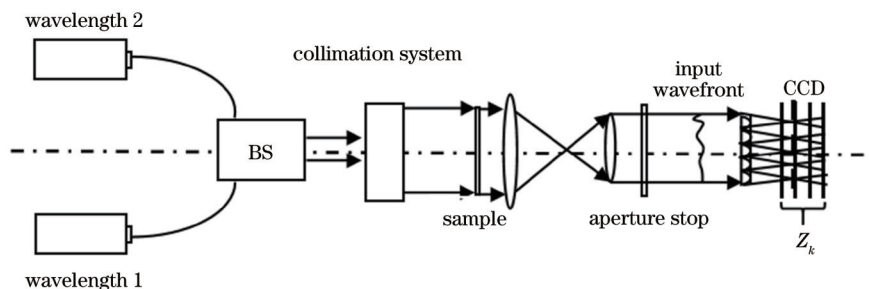


图 4 多平面相位恢复实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup for multiplane phase retrieval

3.1 微透镜阵列

为了重建相位,必须先对微透镜阵列进行校准测量,因为放入相位物体后的成像结果是相位物体和微透镜相位的叠加,相位物体的相位可以通过在成像结果中以数字方式消除微透镜阵列的相位得到。当不放入相位板时,通过 CCD 记录的光强分布,可以得到微

透镜阵列引入的相位或者是光程差(OPD)。相位恢复结果如图 5 所示,图 5(a)为采用微透镜阵列的理论值,图 5(b)为微透镜阵列的定量相位成像结果,图 5(c)为理论值与成像结果的差值。相对误差为 0.47%,相位成像的结果与理论值拟合效果符合预期。

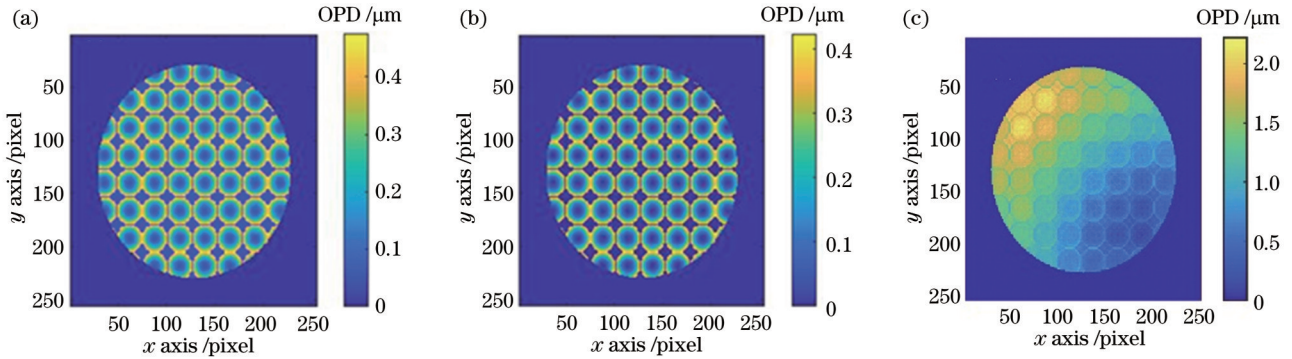


图 5 微透镜阵列的相位成像。(a) 微透镜阵列相位理论值;(b) 相位成像结果;(c) 残差

Fig. 5 Phase imaging of microlens array. (a) Theoretical phase of microlens array; (b) result of phase imaging; (c) residual

3.2 泽尼克像差

泽尼克多项式常用于表示波前畸变,是模拟相位分布很好的选择。如图 6 所示,图 6(a)为前 60 项泽尼克多项式随机系数组合作为输入的波前像差的分布图,最大 OPD 为 $1.5 \mu\text{m}$,相当于在波长为 λ_1 的光照条件下,相位范围约为 $0 \sim 2.34$ 个波长,图 6(b)、6(c)分别为 λ_1 、 λ_2 照明下的相位恢复结果,图 6(d)为最终相位

成像结果,图 6(e)为残差,图 6(f)为归一化评价函数随迭代次数增加的曲线。可以看到,残差的峰谷(PV)值最大约为 $2.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}$,均方根(RMS)约为 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}$,相对误差为 0.16%,评价函数曲线收敛的速度很快。在迭代次数为 146 次时,已经满足迭代终止条件,这说明恢复出的相位分布已经十分接近原先的输入相位。

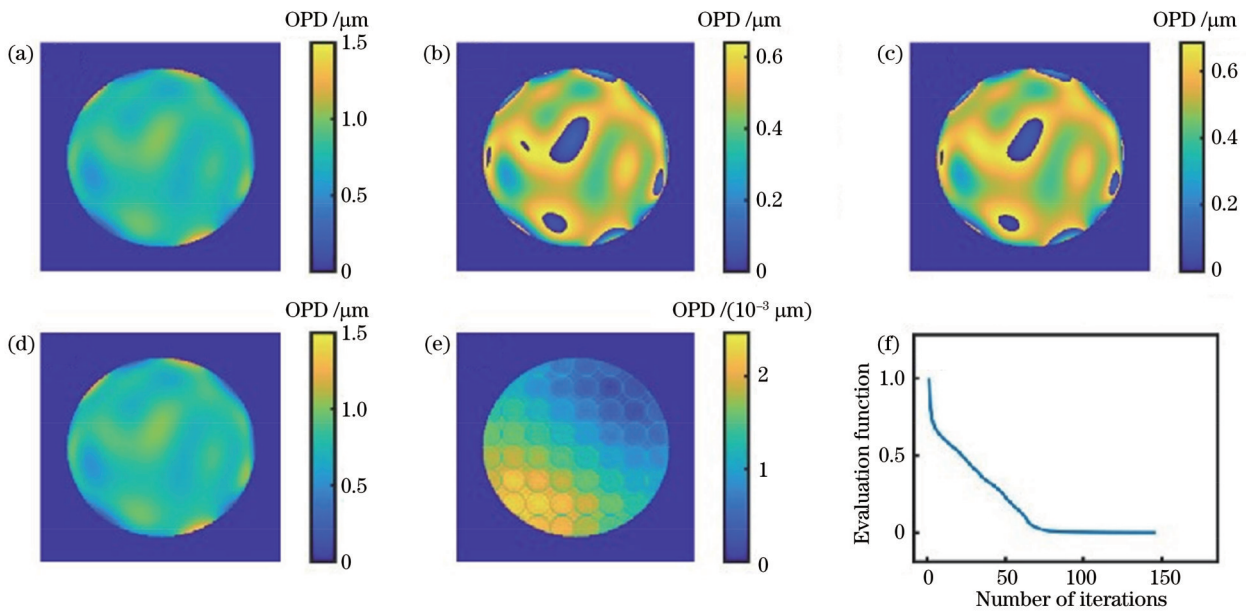


图 6 泽尼克像差的相位成像。(a) 输入的波前像差;(b) λ_1 照明下的相位恢复结果;(c) λ_2 照明下的相位恢复结果;(d) 最终相位成像结果;(e) 残差;(f) 归一化评价函数曲线

Fig. 6 Phase imaging of Zernike aberrations. (a) Input wavefront aberration; (b) phase retrieval result of λ_1 ; (c) phase retrieval result of λ_2 ; (d) final result of phase imaging; (e) residual; (f) normalized evaluation function curve

3.3 Peaks 函数相位

以 Peaks 函数作为相位输入,如图 7 所示,图 7(a)

为输入的波前图,最大 OPD 同样为 $1.5 \mu\text{m}$,图 7(b)、7(c)分别为 λ_1 、 λ_2 照明下的相位恢复结果,图 7(d)为

最终相位成像结果,图 7(e)为残差,图 7(f)为归一化评价函数随迭代次数增加的曲线。可以看到,残差的 PV 值最大约为 $2.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}$, RMS 约为 $1.8 \times$

$10^{-3} \mu\text{m}$, 相对误差为 0.16%, 评价函数曲线收敛的速度很快。在迭代次数为 635 次时, 已经满足迭代终止条件。

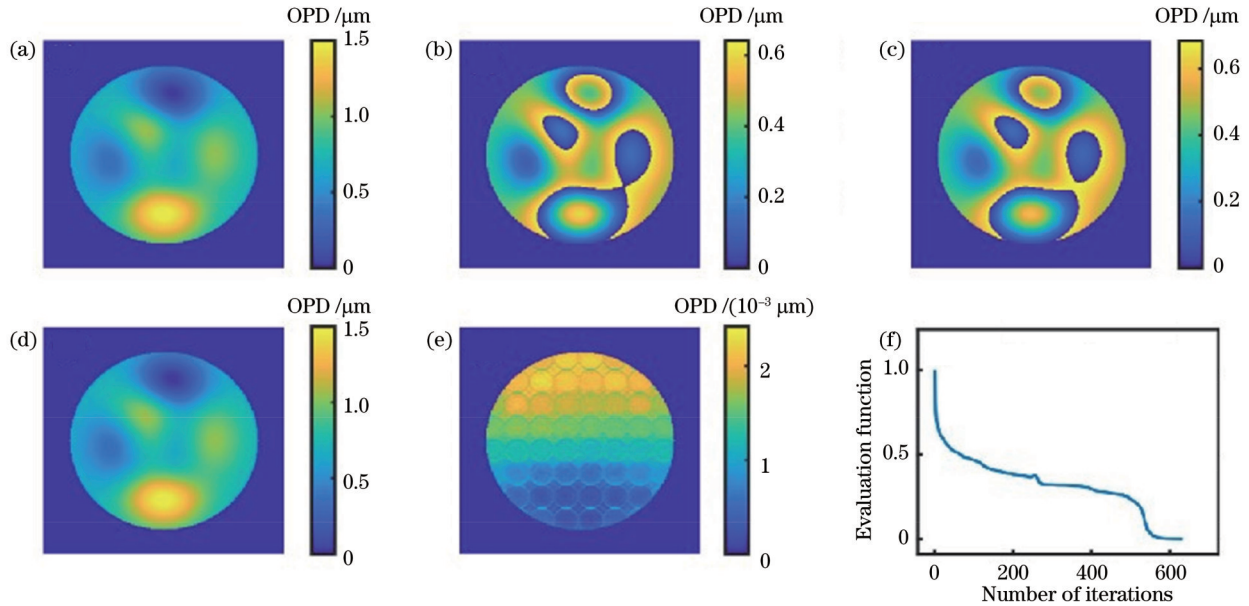


图 7 Peaks 函数的相位成像。(a) 输入的波前; (b) λ_1 照明下的相位恢复结果; (c) λ_2 照明下的相位恢复结果; (d) 最终相位成像结果; (e) 残差; (f) 归一化评价函数曲线

Fig. 7 Phase imaging of Peaks function. (a) Input wavefront; (b) phase retrieval result of λ_1 ; (c) phase retrieval result of λ_2 ; (d) final result of phase imaging; (e) residual; (f) normalized evaluation function curve

3.4 相位物体

透明的相位物体引入的光程差由物体的折射率和厚度共同决定。图 8(a)中的相位物体为透明的细胞, 最大 OPD 为 $1.4 \mu\text{m}$, 图 8(b)、8(c)分别为 λ_1 、 λ_2 照明下

的相位恢复结果, 图 8(d)为最终相位成像结果, 图 8(e)为残差, 图 8(f)为归一化评价函数随迭代次数增加的曲线。可以看到, 残差的 PV 值最大约为 $2.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}$, RMS 约为 $0.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}$, 相对误差为

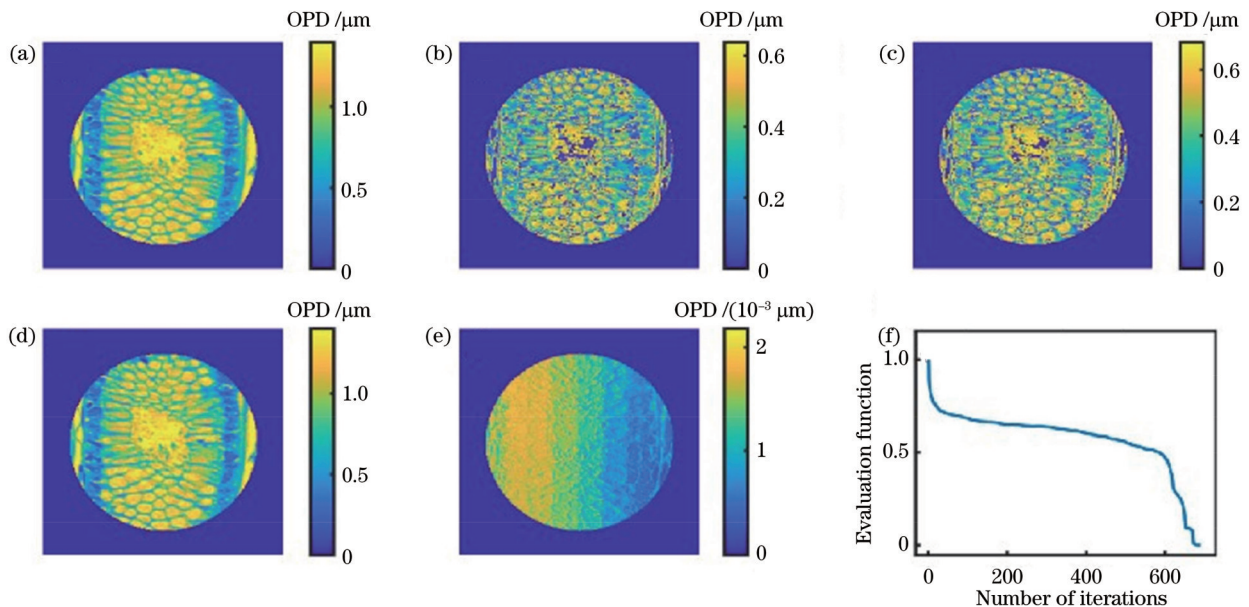


图 8 相位物体的相位成像。(a) 相位物体的波前; (b) λ_1 照明下的相位恢复结果; (c) λ_2 照明下的相位恢复结果; (d) 最终相位成像结果; (e) 残差; (f) 归一化评价函数曲线

Fig. 8 Phase imaging of phase object. (a) Wavefront of phase object; (b) phase retrieval result of λ_1 ; (c) phase retrieval result of λ_2 ; (d) final result of phase imaging; (e) residual; (f) normalized evaluation function curve

0.16%, 在迭代次数为 635 次时, 跳出循环。

上述仿真实验的结果表明, 无论对于微透镜阵列, 还是大幅值的组合像差相位或者是 Peaks 函数、透明的相位物体, 该算法均能够精确地重构被测波前。

4 分析与讨论

大动态测量范围以及快速收敛速度都是本文所提定量相位成像技术的重要特征。因此, 本文就该算法的动态测量范围和收敛速度进行分析。

4.1 动态测量范围

传统的单波长相位恢复算法有一个缺陷, 输入相位的 PV 值一般不能超过照明波长的 1/2, 即相位的 PV 值不超过 π , 否则恢复结果就会出现相位包裹, 需要对包裹的相位进行解包裹操作。此外, 一般情况下, 相位物体引入的光程差超过 1 个波长时, 由于相位过大, 会存在相位恢复速度慢, 甚至不收敛的问题。本文提出的算法虽然也有包裹相位的存在, 但双波长的应用能有效减少相位包裹带来的影响, 还能将算法可执

行的动态范围提高。

由于选择的照明波长分别为 $\lambda_1 = 640 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 685 \text{ nm}$, 理论上该算法的最大 PV 值为合成波长的 1/2, 即 $\lambda_A = 4.9 \mu\text{m}$, 为了找到该算法最大的动态范围, 计算机仿真采用泽尼克多项式第 9 项作为输入相位, 将 PV 值分别设为 0.3、0.9、1.5、2.1、2.7、3.3、3.5 μm ; 如图 9 所示, 为了显示方便, 图中对输入相位和合成波长的相位成像结果均经过归一化。可以看出, 随着波前 PV 值的增大, 单波长的相位恢复结果出现了多层相位包裹, 使用本文提出的算法进行相位成像, 即合成波长 λ_A 的相位恢复结果不仅将包裹相位解包裹, 还和输入的波前像差高度吻合。波前像差高度超过 3.5 μm 后, 该算法就会失效。这也是该算法接下来要继续改进的方向之一。因此, 可以相信目前该算法的最大动态范围是 0~3.5 μm 。相位恢复的残差的 PV 值和 RMS 如表 1 所示。表 1 显示, 随着波前 PV 值的增大, 残差的 PV 值和 RMS 会分别相对保持在 3.0 nm 以内和 1.0 nm 左右。

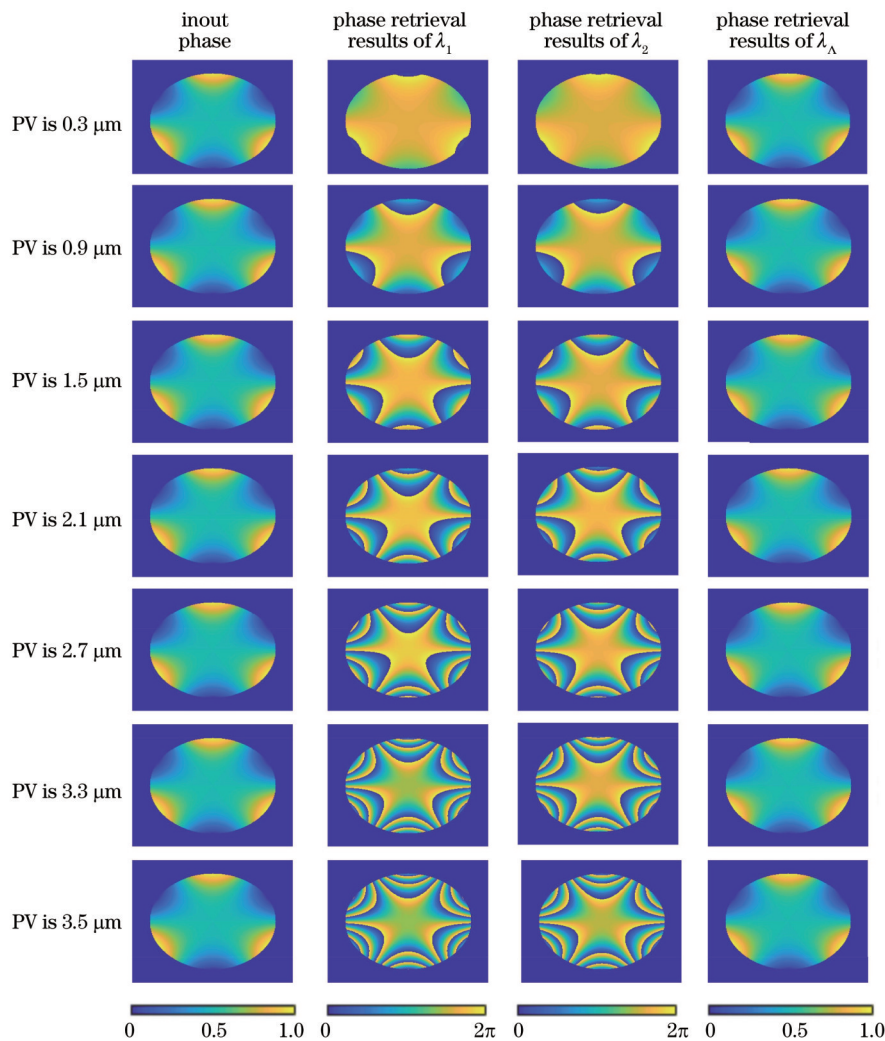


图 9 不同 PV 值情况下的相位恢复结果

Fig. 9 Phase retrieval results under different PV values

表1 不同波前PV值情况下残差的PV值和RMS
Table 1 PV value and RMS of residual under different PV values of wavefront

PV value of wavefront / μm	PV value of residual / nm	RMS of residual / nm
0.3	2.2	0.93
0.9	1.9	0.74
1.5	2.1	0.84
2.1	2.4	0.86
2.7	2.5	0.90
3.3	2.7	1.10
3.5	2.6	1.00

4.2 收敛性

为检验双波长多平面相位恢复算法的收敛性能,将该算法与经典GS算法进行对比实验。以4.1节中的波前像差为例,改变幅值,令其PV值分别为0.3、0.9、1.5、2.1、2.7、3.3、3.5 μm ;分别使用本文提出的算法和传统GS算法对这些待测波前进行相位恢复。

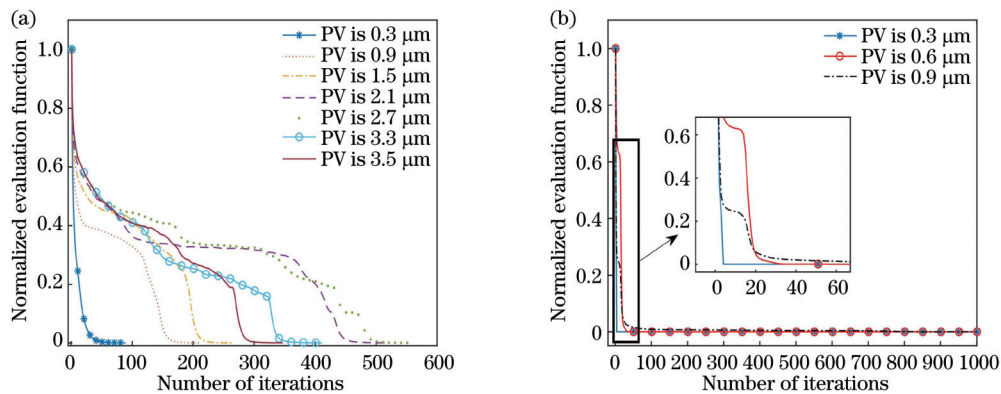


图10 不同PV值被测波前下两种算法的归一化评价函数曲线。(a)提出算法的归一化评价函数曲线;(b)GS算法的归一化评价函数曲线

Fig. 10 Normalized evaluation function curves of two algorithms for input wavefront with different PV values. (a) Normalized evaluation function curves for proposed algorithm; (b) normalized evaluation function curves for GS algorithm

表2 不同波前PV值情况下的迭代次数与迭代时间

Table 2 Iterations and iteration time under different PV values of wavefront

PV value of wavefront / μm	Iterations	Iteration time / s
0.3	89	5.4
0.9	213	12.7
1.5	263	15.5
2.1	515	30.3
2.7	553	32.5
3.3	411	24.4
3.5	347	20.2

5 结 论

本文提出了一种基于波面分割多平面相位恢复的

图10给出了两种算法经过归一化后的评价函数曲线,如图所示,随着被测波前幅值的加大,两种算法的收敛速度均有所下降。

图10(a)为本文提出算法对上述不同PV值的波前重建的评价函数曲线,表2给出了不同PV值情况下的迭代次数与迭代时间。迭代次数分别为89、213、263、515、553、411、347次时,评价函数值达到迭代终止条件。其收敛次数和收敛时间并不完全是随PV值增大而增加,这是算法在迭代过程中的随机性导致的结果。但从收敛时间可以看出,本文提出的定量相位恢复技术能快速地恢复出原始相位。虽然恢复的图像尺寸不大,但能充分表现出其优秀的收敛速度。

对于GS算法,如图10(b)所示,在波前的PV值超过0.9 μm 时,传统的GS算法失效,不能重建波前。并且在GS算法有效的PV值范围内,数值模拟结果显示,迭代次数均在超过1000次时仍未满足迭代终止条件,且一直处于长期的平台期。相较于GS算法,本文提出的算法在收敛速度方面和精度方面都更具有优势。

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引入横向约束,通过在焦面和多个离焦面上记录强度分布引入轴向约束,通过双波长照明引入多波长约束,为大动态范围定量相位成像技术的实现提供了更丰富的强度分布信息。数字仿真实验中,针对结构复杂度不同的大动态范围的相位物体实现了定量相位成像,表明该算法能够保证高精度和快速收敛速度的同时,还可以实现针对大动态范围的相位物体的定量相位成像,是一种极具潜力的定量相位成像技术。

参 考 文 献

- [1] 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.
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.

- [2] 孟章, 丁浩, 聂守平, 等. 深度学习在数字全息显微成像中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(18): 1811006.
Meng Z, Ding H, Nie S P, et al. Application of deep learning in digital holographic microscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(18): 1811006.
- [3] 张雅彬, 陈贤瑞, 刘磊, 等. 基于快速迭代有限差分强度传输方程的相位恢复[J]. 光学学报, 2021, 41(22): 2212004.
Zhang Y B, Chen X R, Liu L, et al. Phase retrieval using transport of intensity equation with fast iterative finite difference [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2212004.
- [4] 王爱业, 潘安, 马彩文, 等. 相位恢复算法: 原理、发展与应用 (特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(11): 20220402.
Wang A Y, Pan A, Ma C W, et al. Phase retrieval algorithms: principles, developments and applications(invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(11): 20220402.
- [5] 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.
- [6] Guo C L, Liu S, Sheridan J T. Iterative phase retrieval algorithms. I: optimization[J]. Applied Optics, 2015, 54(15): 4698-4708.
- [7] Hu J, Shen Y B, Xie X W. Quantitative phase and amplitude imaging with an efficient support constraint[J]. Optics Express, 2019, 27(13): 17993-18004.
- [8] 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.
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.
- [9] Bouman K L, Johnson M D, Zoran D, et al. Computational imaging for VLBI image reconstruction[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 27-30, 2016, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2016: 913-922.
- [10] 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.
- [11] Katkovnik V, Shevkunov I, Petrov N V, et al. Computational super-resolution phase retrieval from multiple phase-coded diffraction patterns: simulation study and experiments[J]. Optica, 2017, 4(7): 786-794.
- [12] Gerchberg R. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. Optik, 1972, 35: 237-246.
- [13] Fienup J R. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform[J]. Optics Letters, 1978, 3(1): 27-29.
- [14] Fienup J R. Reconstruction of a complex-valued object from the modulus of its Fourier transform using a support constraint[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1987, 4(1): 118-123.
- [15] Agour M, Falldorf C, Kopylow C V, et al. Automated compensation of misalignment in phase retrieval based on a spatial light modulator[J]. Applied Optics, 2011, 50(24): 4779-4787.
- [16] Pedrini G, Osten W, Zhang Y. Wave-front reconstruction from a sequence of interferograms recorded at different planes[J]. Optics Letters, 2005, 30(8): 833-835.
- [17] Anand A, Chhaniwal V K, Almoro P, et al. Shape and deformation measurements of 3D objects using volume speckle field and phase retrieval[J]. Optics Letters, 2009, 34(10): 1522-1524.
- [18] Rodrigo J A, Duadi H, Alieva T, et al. Multi-stage phase retrieval algorithm based upon the gyration transform[J]. Optics Express, 2010, 18(2): 1510-1520.
- [19] Jun T. Multi-aperture optics as a universal platform for computational imaging[J]. Optical Review, 2016, 23(5): 859-864.
- [20] 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.
- [21] 宋静威, 李常伟, 张思炯. 基于离焦型夏克-哈特曼传感器的定量相位成像技术[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0911002.
Song J W, Li C W, Zhang S J. Quantitative phase imaging based on defocused shack-hartmann sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0911002.
- [22] 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.
- [23] Zhang S. Digital multiple wavelength phase shifting algorithm[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7432: 74320N.

Quantitative Phase Imaging Technology Based on Wavefront Segmentation and Multiplane Phase Retrieval

Gui Bohan^{1,2,3}, Li Changwei^{1,2,3*}

¹National Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, Jiangsu, China;

²CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042, Jiangsu, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective The phase problem is encountered and required to be solved in many optical applications, such as optical metrology, adaptive optics, and biomedical imaging. This problem arises because optical detectors can only record the amplitudes of light beams, and the phases of light beams are missed. However, the transparent object, such as a living

cell, does not affect the amplitude of a light beam passing through it, except for a phase shift, and phase imaging is the only way to acquire the structure information of transparent objects. Although the Zernike phase contrast microscope can convert a phase shift of the light beam passing through a transparent object, it is not quantitative and only effective for small phase shifts. Quantitative phase imaging (QPI), which is a label-free and powerful technique for providing quantitative information of transparent objects, attracts growing interest in biomedical applications. Up to now, the mainstream techniques for QPI are digital holography microscopy and phase retrieval. Digital holography microscopy, an interferometric technique, is highly accurate but extremely sensitive to the environment. Phase retrieval can recover the input phase from intensity-only measurements, but it has a stagnation problem and a limited dynamical range. These drawbacks have greatly limited the application of phase retrieval. In this study, a QPI technique based on both wavefront segmentation by a microlens array and multiplane phase retrieval is proposed for achieving QPI of phase objects with a large dynamic range. This technique has the characteristics of high accuracy, fast convergence speed, and large dynamic range, which can be a potential technique for QPI of phase objects in biomedical imaging.

Methods The proposed method for QPI of a phase object is based on both wavefront segmentation by a microlens array and multiplane phase retrieval. In order to acquire QPI of a phase object with a large dynamic range, the proposed method imposes three constraints on the light field passing through the phase object. The first one is wavefront segmentation, which divides the input wavefront into small ones by a microlens array. The second one involves multiple intensity distributions recorded at different diffraction planes along the axial direction of the microlens array. Due to the abundant information provided by intensity maps at different diffraction distances, phase retrieval algorithms typically converge quickly. The third one is to employ multiple illuminations at different wavelengths. In order to acquire an unwrapped phase imaging of a phase object by the proposed approach, three steps need to be performed: firstly, recording multiple diffraction intensity distributions near the focal plane of the microlens array under different illumination wavelengths; secondly, retrieving the phase of the phase object using multi-plane phase retrieval at different wavelengths, respectively; finally, unwrapping the phase of the phase object using the retrieved phases at the synthetic wavelength. A series of numerical experiments are performed to evaluate the performance of the proposed method. Four different types of aberrations (the phase of a microlens array, complex random combination wavefronts, peak functions, and cell slices) are selected as the phase to be measured for exploring the versatility of the proposed method under the illumination wavelengths of 640 nm and 685 nm. Then, phase retrieval of wavefronts with different peak-to-valley (PV) values is performed to verify the large dynamic range of the proposed method. At last, the convergence of the proposed method is compared with that of the classical phase retrieval algorithm.

Results and Discussions The numerical experiments for retrieving four different types of phases show that the proposed method can recover phases of phase objects quickly and accurately (Figs. 5, 6, 7, and 8), which indicates that the proposed method is an effective way for QPI of phase objects. Using the proposed method, phase retrieval of a wavefront with a PV value exceeding $3\ \mu\text{m}$ is achieved under the illumination wavelengths of 640 nm and 685 nm, nearly 5 times one illumination wavelength, indicating that the method covers a large dynamic range (Fig. 9 and Table 1). Furthermore, the comparison of convergence speed shows that the convergence of the proposed method is always better than that of the classical phase retrieval algorithm (Fig. 10 and Table 2).

Conclusions In this study, a QPI technique for phase objects based on both wavefront segmentation by a microlens array and multiplane phase retrieval is proposed. This technique requires the recording of the intensity distribution maps of different diffraction distances near the focal plane of the microlens array under two different illumination wavelengths. The recorded intensity distribution maps are used to recover the digital complex light field passing through the phase object by multi-plane phase retrieval algorithm. The retrieved digital complex light field phases at different wavelengths are used to calculate the phase image of the phase object at a synthetic wavelength. In the numerical simulation experiments, the QPI for different types of phase objects with different PV values is achieved. It shows that this technique is powerful and efficient for QPI and serves as a promising technique for QPI of phase objects.

Key words imaging system; multiplane phase retrieval; dual wavelength; microlens array; quantitative phase imaging