

## 远心同-离轴混合数字全息高分辨率重建方法

钟志 赵婉婷 单明广 刘磊

## Telecentric in-line-and-off-axis hybrid digital holographic high-resolution reconstruction method

Zhong Zhi Zhao Wan-Ting Shan Ming-Guang Liu Lei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 154202 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210190

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210190>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于数字全息的血红细胞显微成像技术

Digital holographic microscopy for red blood cell imaging

物理学报. 2020, 69(16): 164201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200357>

#### 基于位相变更的非相干数字全息自适应成像

Adaptive imaging by incoherent digital holography based on phase change

物理学报. 2018, 67(4): 044202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172202>

#### 基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率计算成像系统设计

Design of monocentric wide field-of-view and high-resolution computational imaging system

物理学报. 2019, 68(8): 084201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182229>

#### 面向地壳形变观测的超高分辨率光纤应变传感系统

Ultrahigh resolution fiber optic strain sensing system for crustal deformation observation

物理学报. 2017, 66(7): 074208 <https://doi.org/10.7498/aps.66.074208>

#### 基于深紫外激光-光发射电子显微技术的高分辨率磁畴成像

High resolution imaging based on photo-emission electron microscopy excited by deep ultraviolet laser

物理学报. 2020, 69(9): 096801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200083>

#### 新型高分辨率电子能量损失谱仪与表面元激发研究

Development of novel high-resolution electron energy loss spectroscopy and related studies on surface excitations

物理学报. 2018, 67(12): 127901 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180689>

## 远心同-离轴混合数字全息高分辨率重建方法\*

钟志<sup>1)2)</sup> 赵婉婷<sup>1)</sup> 单明广<sup>1)2)†</sup> 刘磊<sup>1)‡</sup>

1) (哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

2) (哈尔滨工程大学, 先进船舶通信与信息技术工信部重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2021 年 1 月 26 日收到; 2021 年 3 月 18 日收到修改稿)

现存的同-离轴混合数字全息技术可同时解决同轴全息共轭像消除困难和离轴全息分辨率受限的问题, 但需预测衍射距离, 不仅复杂耗时, 且精度有限; 而远心成像技术可获得非衍射图像, 无需预测衍射距离, 并具有可消除球面像差和散焦像差等特性. 因此, 本文将远心成像技术引入同-离轴混合数字全息技术中, 提出一种远心同-离轴混合数字全息高分辨率重建方法. 该方法利用远心同-离轴混合数字全息系统, 分别采集聚焦的离轴全息图和同轴全息图; 进而将离轴全息图获得的低分辨率相位信息与同轴全息图获得的振幅信息相复合, 作为迭代恢复过程的物光复振幅初始值, 并分别在空域和频域进行约束迭代, 实现高分辨率重建. 实验结果表明, 该方法无需衍射距离等先验信息, 便可很好地消除共轭像和系统畸变的干扰, 并可充分利用图像传感器的空间带宽积, 实现物体的高分辨率重建.

**关键词:** 数字全息, 远心成像, 迭代恢复, 高分辨率**PACS:** 42.40.Kw, 42.15.Eq, 07.05.Kf, 87.57.cf**DOI:** 10.7498/aps.70.20210190

## 1 引言

数字全息技术<sup>[1-3]</sup>由相机记录物光和参考光干涉图样, 并由计算机恢复待测相位, 具有全场定量、非接触、无需对样品做特殊处理等独特优点, 已作为重要成像测试手段广泛应用于生物医学、微纳制造和材料科学等领域<sup>[4-14]</sup>. 根据物光和参考光之间是否存在夹角, 数字全息可分为离轴数字全息<sup>[15,16]</sup>和同轴数字全息<sup>[17,18]</sup>. 离轴数字全息可将实像项与共轭像项和零级项的频谱分离, 利用带通滤波器选取实像信息, 但是受最小记录距离的限制, 不能获得较大的数值孔径, 空间带宽积利用率低, 滤波过程损失了很多高频信息, 进而降低了成像的分辨率. 同轴数字全息可充分利用图像传感器

的空间带宽积, 获得较大的数值孔径, 理论上可以获得较高的成像分辨率, 但是同轴数字全息的实像项、共轭像项和零级项重叠在一起, 无法分离出实像信息. 因此, 传统同轴数字全息一般采用相移法<sup>[19,20]</sup>来消除共轭像, 但是相移法需要多波长拍摄或者多次拍摄, 同时对实验装置要求很高, 实验过程中实现难度较大. Gabor 同轴数字全息一般采用迭代算法<sup>[21-26]</sup>来消除共轭像, 但迭代算法对待测物体要求较高, 它受待测物体的稀疏性、弱相位波动、支持域等一系列因素的约束, 只有在满足条件的情况下, 才可以恢复出物体信息, 而待测物体自身性质无法决定, 支持域的确定也具有难度.

为兼顾离轴结构和同轴结构的优势, 2015 年, Orz6<sup>[27]</sup>提出一种同-离轴混合数字全息恢复方法, 先将离轴数字全息恢复的物光复振幅的低频成分

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61775046)、黑龙江省自然科学基金 (批准号: LC2018027) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: 3072021CF0803, 3072021CFJ0801, 3072021CFT0803) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: smgsir@gmail.com

‡ 通信作者. E-mail: liulei2015@hrbeu.edu.cn

提取出来,再在同轴数字全息迭代的过程中进行低频替换,实现待测物体的重建,但当遇到强相位波动的物体时,其迭代过程无法收敛. 2018年,王凤鹏等<sup>[28]</sup>也提出了一种同-离轴混合的相位恢复方法,利用约束最优化算法<sup>[29]</sup>从离轴数字全息图中获取物光场的近似相位分布,并复合同轴全息图的振幅信息作为迭代过程的初始值,进而利用迭代算法实现待测物体高分辨率重建,但该方法因为采用平均值滤波,依然损失了高频成分,且需多次迭代才能达到效果,损失了大量的时间;同时,其重建过程还需参考光的先验信息,而在实验过程中很难获取准确稳定的参考光. 尤为重要,以上两种方法都是在物面和全息面之间迭代完成重建工作,从而需要精准的衍射距离;衍射距离精准预测需利用聚焦算法,而其成功是以大量时间消耗为代价的,这将进一步提高重建难度,浪费时间成本.

远心成像系统<sup>[30–32]</sup>是传统数字全息经常采用的一种典型的光路结构,它可以很好地抑制球面像差和散焦像差的影响,使同轴数字全息保持最大空间带宽积;同时,可根据所需视场的空间分辨率调整缩放系数,并可根据透镜焦距调整物体和图像传感器的位置,获得聚焦的清晰图像,从而在后期图像处理过程中无需对物光复振幅从全息面到物面进行反衍射的数值重建,进一步避免了衍射距离预测的复杂过程,节省了时间,降低了重建难度. 因此,本文将远心成像技术引入同-离轴混合数字全息技术中,提出一种远心同-离轴混合数字全息高分辨率重建方法,充分利用远心成像技术与同-离轴混合技术的优势,在摒除衍射距离等先验信息以提升重建效率的同时,抑制干扰项及系统像差,实现高分辨率系统成像重建.

## 2 远心同-离轴混合数字全息重建方法

基于远心系统的远心同-离轴混合数字全息成像系统见图1. 从激光器发射出的激光,经过准直扩束装置 BE 准直扩束后,由第一分光棱镜 BS1 分光. 其中透射光被平面反射镜 M1 反射并调制倾角形成参考光,反射光被反射镜 M2 再反射后经过待测物体形成物光,物光经由透镜 L1 和 L2 构成的远心系统调制,最后通过第二分光棱镜 BS2 后,与参考光汇合并发生干涉,在 CCD 成像靶面上形成全息图. 为了消除球差和散焦像差影响,远心

系统中透镜 L1 和 L2 需共轭配置形成  $4f$  系统,待测物体 S 置于透镜 L1 的前焦面,相机置于透镜 L2 的后焦面. 实验时,先记录一幅离轴全息图,再遮挡参考光记录一幅 Gabor 同轴全息图.

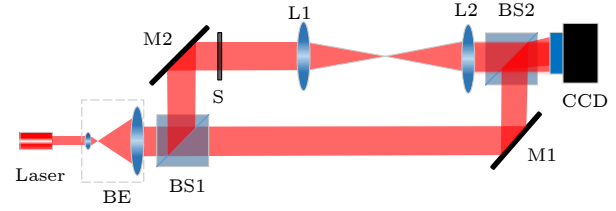


图1 远心同-离轴混合数字全息成像系统示意图

Fig. 1. Schematic of the telecentric in-line-and-off-axis hybrid digital holography system.

为了实现上述系统的成像重建,提出了一种远心同-离轴混合数字全息高分辨率重建方法,将离轴全息图获得的低分辨率相位信息与同轴全息图的振幅信息相结合作为迭代恢复过程的初始物光复振幅,并将其在空域和频域的振幅信息作为迭代过程的振幅约束项,同时将从离轴全息图中获取的物光复振幅低频信息作为迭代过程的频谱约束项,最终实现物体的高分辨率重建. 重建过程如图2所示,具体方法如下.

### 1) 全息图

假设物面的物光复振幅为  $O(x, y)$ , 则可得到同轴全息图如下:

$$I_{\text{in-line}} = |O(x, y)|^2. \quad (1)$$

假设参考光复振幅为  $R(x, y)$ , 则可得到离轴全息图和背景全息图如下:

$$\begin{aligned} I_{\text{off}} &= |O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 + O^*(x, y) R(x, y) \\ &\quad + O(x, y) R^*(x, y) \\ &= a + 0.5b \{ \exp[i(\varphi_{\text{off}} + 2\pi f_{x_0}x + 2\pi f_{y_0}y + \varphi_b)] \\ &\quad + \exp[-i(\varphi_{\text{off}} + 2\pi f_{x_0}x + 2\pi f_{y_0}y + \varphi_b)] \}, \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{off\_B}} &= a + 0.5b \{ \exp[i(2\pi f_{x_0}x + 2\pi f_{y_0}y + \varphi_b)] \\ &\quad + \exp[-i(2\pi f_{x_0}x + 2\pi f_{y_0}y + \varphi_b)] \}, \quad (3) \end{aligned}$$

其中,  $x$  和  $y$  为空域坐标,  $O^*(x, y)$  和  $R^*(x, y)$  分别为  $O(x, y)$  和  $R(x, y)$  的共轭项,  $I_{\text{off}}$  为离轴全息图,  $I_{\text{off\_B}}$  为背景全息图,  $a$  为全息图的平均强度,  $b$  为干涉条纹的调制度,  $\varphi_{\text{off}}$  为离轴全息待测样品相位,  $f_{x_0}$  和  $f_{y_0}$  为水平方向和竖直方向的载波频率,  $\varphi_b$  为背景相位.

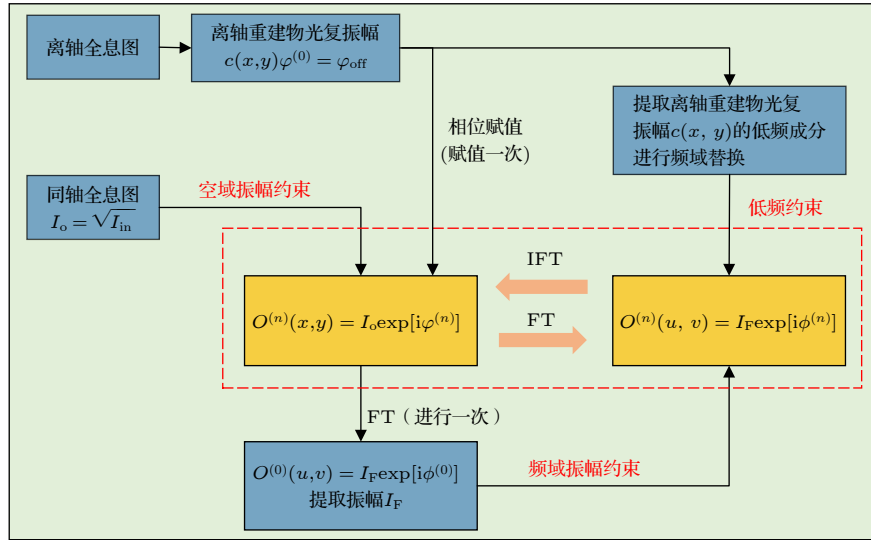


图 2 远心同-离轴混合数字全息重建算法框图

Fig. 2. Schematic of telecentric in-line-and-off-axis hybrid digital holographic reconstruction algorithm.

## 2) 离轴物光场重建

分别对离轴全息图和离轴背景全息图进行傅里叶变换 (FT), 可在频谱域中将零频分量和互相关项完全分离; 利用带通滤波器 (BPF) 选择实像项, 然后再分别进行傅里叶逆变换 (IFT), 获取所需的有样品实像物光信息  $O_{\text{off}}(x, y)$  和背景实像物光信息  $O_{\text{off\_B}}(x, y)$ , 即

$$O_{\text{off}}(x, y) = \text{IFT} \{ \text{FT}(I_{\text{off}}) \times \text{BPF} \} \\ = 0.5b \{ \exp[i(\varphi_{\text{off}} + 2\pi f_{x_0}x + 2\pi f_{y_0}y + \varphi_b)] \}, \quad (4)$$

$$O_{\text{off\_B}}(x, y) = \text{IFT} \{ \text{FT}(I_{\text{off\_B}}) \times \text{BPF} \} \\ = 0.5b \{ \exp[i(2\pi f_{x_0}x + 2\pi f_{y_0}y + \varphi_b)] \}. \quad (5)$$

应用除法算法<sup>[33,34]</sup>, 得到离轴数字全息去除背景物光复振幅  $c(x, y)$ , 即

$$c(x, y) = O_{\text{off}}(x, y) / O_{\text{off\_B}}(x, y). \quad (6)$$

提取离轴全息待测样品相位  $\varphi_{\text{off}}$ , 同时利用低通滤波器 (LPF) 滤出物光复振幅的低频成分  $O_{\text{low\_off}}(u, v)$ , 即

$$\varphi_{\text{off}} = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[c(x, y)]}{\text{Re}[c(x, y)]} \right\}, \quad (7)$$

$$O_{\text{low\_off}}(u, v) = \text{FT}[c(x, y)] \times \text{LPF}, \quad (8)$$

其中,  $\arctan$  为三角反正切函数;  $\text{Im}$ ,  $\text{Re}$  分别为提取虚部和实部操作;  $u, v$  为频域坐标. 需要注意的是, 为了保证获取信息的一致性, LPF 的外形需与所选择的 BPF 保持一致, 但 LPF 的半径不可大于 BPF 的半径.

## 3) 同-离轴混合成像重建

(a) 利用同轴全息图的强度  $I_0 = \sqrt{I_{\text{in-line}}}$  与第 2) 步获得的离轴全息待测样品相位  $\varphi_{\text{off}}$ , 组合成初始物光复振幅为  $O^{(0)}(x, y) = I_0 \exp(i\varphi_{\text{off}})$ ;

(b) 将初始物光复振幅进行傅里叶变换得到频域的复振幅分布为  $O^{(0)}(u, v) = I_F \exp[i\phi^{(0)}]$ , 提取振幅  $I_F$ , 其中,  $\phi^{(0)}$  为频域初始物光相位分布;

(c)  $O^{(n)}(x, y)$  为第  $n$  次迭代所生成的空域物光复振幅, 当  $n = 0$  时即为初始物光复振幅. 将空域物光复振幅分布  $O^{(n)}(x, y) = I_0 \exp[i\varphi^{(n)}]$  进行傅里叶变换获得频域物光复振幅, 用第 2) 步中  $O_{\text{low\_off}}(u, v)$  替换它的低频成分, 并且用  $I_F$  替换它的振幅, 得到新的频域物光复振幅  $O^{(n)}(u, v) = I_F \exp[i\phi^{(n)}]$ , 其中,  $\varphi^{(n)}$  和  $\phi^{(n)}$  分别为空域和频域第  $n$  次迭代的相位分布;

(d) 将更新后的频域物光复振幅通过傅里叶逆变换获得新的空域物光复振幅, 并用  $I_0$  替换它的振幅获得  $O^{(n+1)}(x, y) = I_0 \exp[i\varphi^{(n+1)}]$ ;

(e) 重复步骤 (c) 和 (d) 进行迭代, 直至收敛. 输出空域物光复振幅分布, 即可得到高分辨率再现现象.

## 3 模拟验证与分析

为了验证所提方法的有效性, 利用计算机进行模拟仿真, 设置的初始参数为: 模拟物体为  $1024 \times 1024$  的分辨率板, 设置采样频率为  $4.8 \mu\text{m}$ , 其中



背景部分振幅透过率为 0.2, 相位为 0 rad, 线条和数字部分, 振幅透过率为 1, 相位为 -2 rad; 光波长为 632.8 nm, 参考光的入射角度为 21.7 mrad. 模拟生成的同轴全息图如图 3(a) 所示, 离轴全息图如图 3(b) 所示. 由于传统的同-离轴混合算法 [27,28] 无法对非衍射全息图进行重建, 因此下文分析过程只与传统同轴算法和离轴算法进行对比分析.

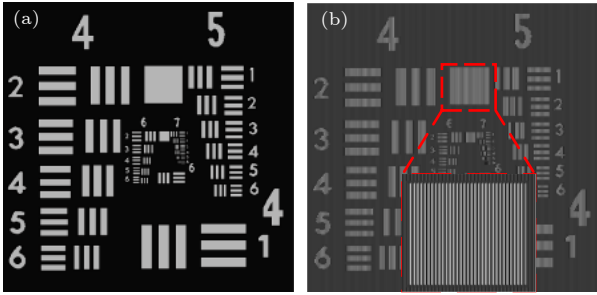


图 3 (a) 同轴全息图; (b) 离轴全息图  
Fig. 3. (a) In-line hologram; (b) off-axis hologram.

利用传统同轴算法 [21] 对同轴全息图进行重建, 结果如图 4 所示. 由于重建的是无衍射过程的全息图, 振幅像不受共轭像的影响, 所以保持同轴的高分辨率特性; 但是从相位像看出, 相位值恢复并不准确, 即传统同轴算法不具有准确恢复相位信息的能力.

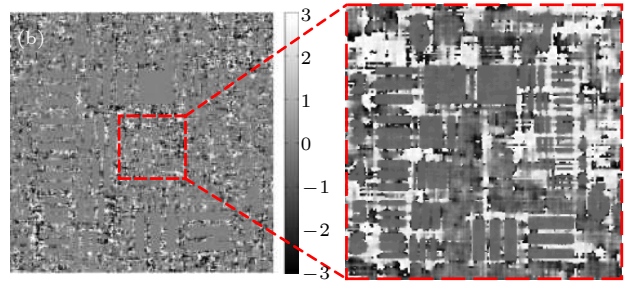
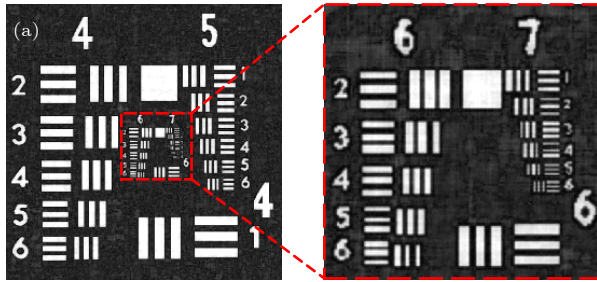


图 4 同轴全息图再现结果 (a) 振幅像; (b) 相位像

Fig. 4. Reconstructed results of in-line hologram: (a) Amplitude image; (b) phase image.

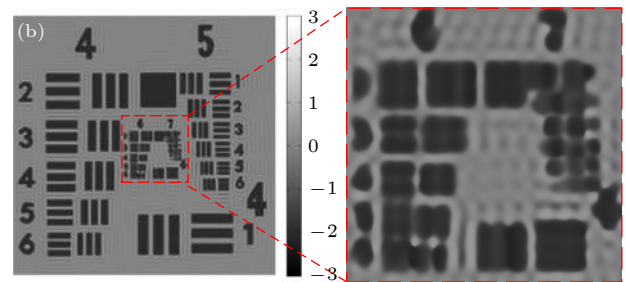
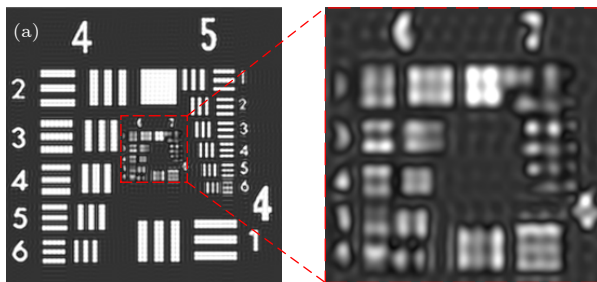


图 5 离轴全息图再现结果 (a) 振幅像; (b) 相位像

Fig. 5. Reconstructed results of off-axis hologram: (a) Amplitude image; (b) phase image.

利用离轴频域滤波方法 [16] 对离轴全息图进行重建, 结果如图 5 所示. 从振幅像和相位像可以看出, 信息恢复基本准确, 但是由于引入了带通滤波器, 损失了高频信息, 再现像局部放大不清晰, 数字线条轮廓模糊, 分辨率较低.

利用本文的远心同-离轴混合数字全息重建方法对全息图进行重建. 本文采用均方误差 ( $M_{SE}$ ) 对算法的收敛性进行评价, 即

$$M_{SE} = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [O_0(x, y) - O(x, y)]^2, \quad (9)$$

其中  $\sum$  为求和符号,  $M$  和  $N$  为原始像和再现像在  $x$  和  $y$  方向上的像素数,  $O_0(x, y)$  为原始像,  $O(x, y)$  为再现像. 基于此, 获得的再现像均方误差随迭代次数的变化如图 6 所示, 其中图 6(a) 为振幅均方误差收敛曲线, 图 6(b) 为相位均方误差收敛曲线, 可以看出, 在经过 15 次迭代后, 两条曲线均达到了良好的收敛效果. 图 7 为同-离轴混合数字全息重建算法恢复的再现结果, 可以看出, 不仅振幅信息能准确恢复, 相位信息也能准确恢复, 尤其中间区域放大部分更加清晰, 肉眼即可分辨出数字和线条. 由于峰值信噪比 PSNR 是均方误差  $M_{SE}$  相对于最大信号值平方的对数表现形式, 可以有效估计重建像与原始像之间的误差, 能更加直观地衡量

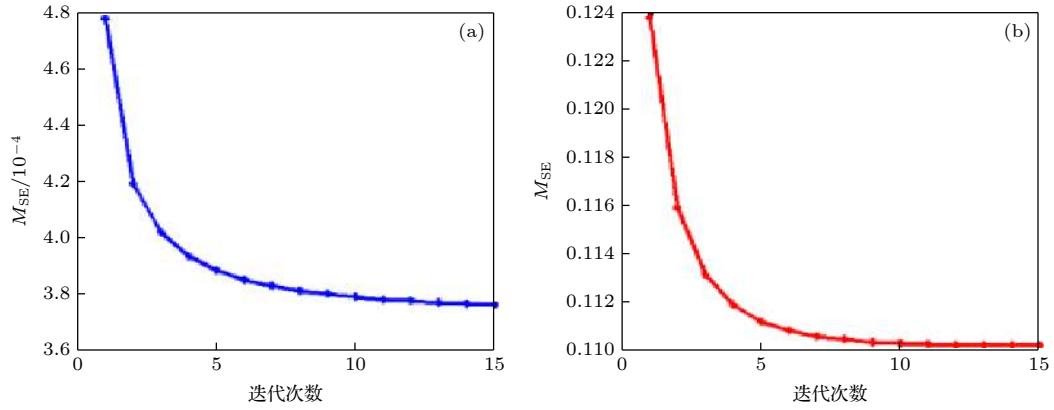


图 6 再现像误差随迭代次数变化 (a) 振幅均方误差收敛曲线; (b) 相位均方误差收敛曲线

Fig. 6. Mean squared errors at each iteration: (a) Amplitude mean square error convergence curve; (b) phase mean square error convergence curve.

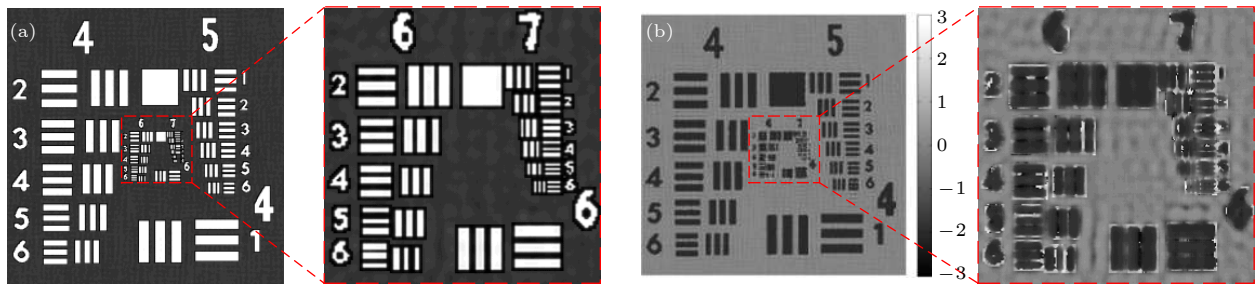


图 7 同-离轴混合数字全息再现结果 (a) 振幅像; (b) 相位像

Fig. 7. Reconstructed results obtained by the in-line-and-off-axis hybrid digital holography: (a) Amplitude image; (b) phase image.

重建像的品质, 因此, 表 1 列出了不同算法重建振幅和相位的峰值信噪比, 可以看出, 相比于同轴算法和离轴算法, 混合算法均获得更高的峰值信噪比, 说明了本算法的优越性.

表 1 不同算法重建振幅和相位的峰值信噪比  
Table 1. Peak signal-to-noise ratio (PSNR) of amplitudes and phases reconstructed by different algorithms.

	同轴算法	离轴算法	混合算法
振幅PSNR/dB	71.55	66.54	82.37
相位PSNR/dB	43.69	55.29	57.70

## 4 实验结果及分析

为了进一步验证所提方法的有效性, 构建如图 1 所示的实验装置, 其中激光器为波长 632.8 nm 的 He-Ne 激光器; 构成远心系统的透镜 L1 的焦距为 50 mm, 透镜 L2 的焦距为 200 mm; CCD 的像素数为  $1024 \times 1280$ , 像素大小为  $4.8 \mu\text{m}$ , 因此, 本实验中理论最小分辨率为  $4.8 \mu\text{m}$ . 实验时, 先记录一幅离轴全息图, 再挡住参考光记录一幅

Gabor 同轴全息图. 考虑实际测量中无法获取实际图像, 以仿真收敛结果作为依据判断实际测量结果的收敛性, 因此, 以下实验的迭代过程均以 15 次迭代为结束条件.

首先, 以 USAF 分辨率板为待测物体进行验证, 由于该分辨率板是振幅形物体, 因此只给出振幅的重建结果. 图 8(a) 为同轴全息图, 图 8(b) 为离轴全息图, 图 8(c) 为传统同轴算法重建得到的振幅结果, 由于利用远心系统所拍摄的同轴全息图即为非衍射过程的强度图, 因此传统同轴方法重建的振幅结果取决于同轴全息图的强度, 可以观测到第 5 组第 6 个元素, 线宽为  $8.7 \mu\text{m}$ , 但是在数字线条附近会出现模糊的虚影. 图 8(d) 为利用离轴频谱滤波算法对离轴全息图进行重建获得的振幅结果, 明显可见, 放大部分数字线条边界模糊, 细节部分也无法分辨, 能够分辨的第 4 组第 1 个元素, 线宽为  $31.3 \mu\text{m}$ , 远低于理论分辨率, 究其原因, 是因为离轴全息重建过程采用频域滤波而使高频信息丢失. 图 8(e) 为混合算法重建获得的振幅结果, 可看出, 放大部分数字线条的边界更加锐利, 中间

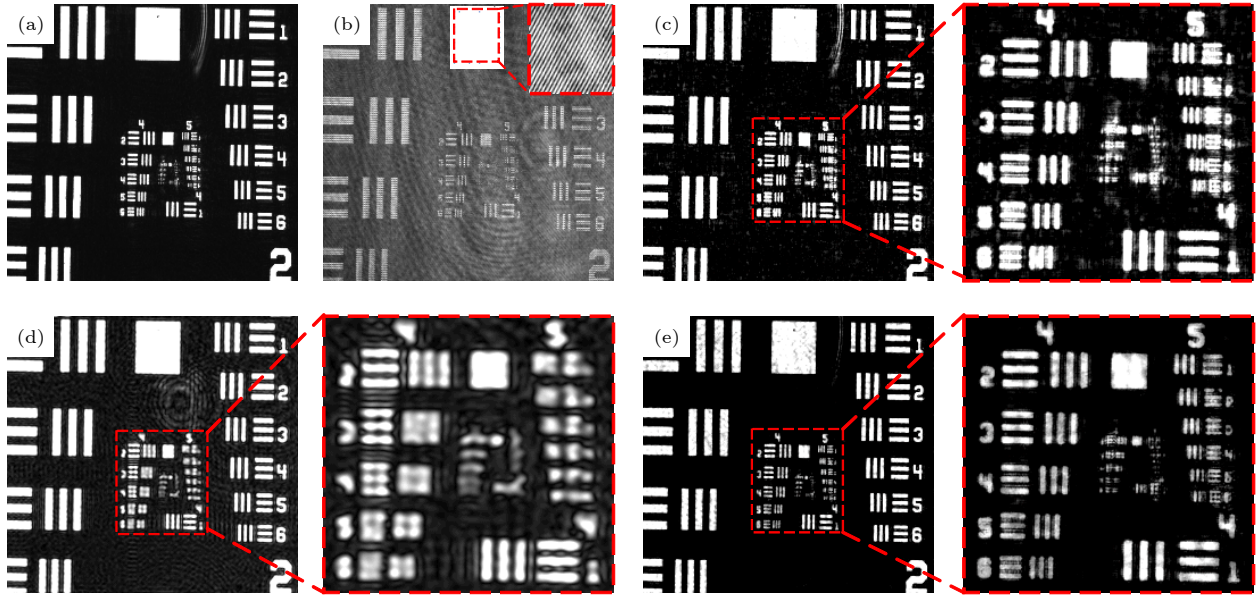


图 8 USAF 分辨率板实验结果 (a) 同轴全息图; (b) 离轴全息图; (c) 同轴数字全息再现像; (d) 离轴数字全息再现像; (e) 同-离轴混合数字全息再现像

Fig. 8. Experimental results of USAF resolution target: (a) In-line hologram; (b) off-axis hologram; (c) amplitude reconstructed image of the in-line hologram; (d) amplitude reconstructed image of the off-axis hologram; (e) amplitude reconstructed image of the in-line-and-off-axis hybrid digital holography.

细节部分更加清晰,例如第 5 组中数字旁的伪影也消失不见,从而说明本方法重建质量既远高于离轴算法,也优于同轴算法,且更加接近理论分辨率。

在第 2 个实验中,以洋葱表皮细胞为待测物体进行实验验证,获得的同轴全息图如图 9(a) 所示,离轴全息图如图 9(b) 所示,图 9(c) 和图 9(d) 为利用传统同轴算法进行重建所得到的振幅像和相位像。从振幅恢复结果可以看出,借助于远心系统的优势,振幅恢复效果较好地与理论分析保持一致;但从相位恢复结果看,没有准确得到洋葱表皮细胞的相位信息分布,说明传统同轴算法对于远心系统下的聚焦全息图的相位重建能力有限。图 9(e) 和图 9(f) 为利用离轴算法重建得到的振幅像和相位像,从重建结果可以看出,洋葱表皮细胞虽然结构清晰可见,但是高频信息丢失,分辨率较低。图 9(g) 和图 9(h) 为本文混合算法重建得到的振幅像和相位像。从振幅恢复结果可以看出,混合算法可以获得与同轴算法一致的分辨率,但洋葱表皮细胞纹路边界更加清晰;从相位像可以看出,混合算法可以有效恢复出洋葱表皮细胞的相位信息,且相对于离轴算法提高了细胞纹路的清晰度。为了更好地比较,对图 9(f) 和图 9(h) 中虚线部分进行剖面,获得的结果如图 9(i) 所示,进一步可以看出,在细胞壁纹路处,混合数字全息恢复结果保留了更多的

高频信息,分辨率更高。

最后,以蜜蜂翅膀为待测物体进行了实验验证。图 10(a) 为蜜蜂翅膀的同轴全息图,图 10(b) 为蜜蜂翅膀的离轴全息图。图 10(c) 和图 10(d) 为利用传统同轴算法进行重建得到的振幅像和相位像,图 10(e) 和图 10(f) 为利用离轴算法重建得到的振幅像和相位像,图 10(g) 和图 10(h) 为本文混合算法重建得到的振幅像和相位像,图 10(i) 为相位像中竖线部分蜜蜂翅膀纹路的相位剖面图。从图 10 可以得到同样的结论,即混合算法能同时实现振幅图像和相位图像的高分辨率重建,尤其从图 10(i) 可以看出,混合算法可以明显恢复出离轴算法丢失的高频信息,明显提高了成像分辨率。

## 5 结 论

本文利用远心成像技术与同-离轴数字全息技术的各自优势,提出一种远心同-离轴混合数字全息高分辨率重建方法,在构建实验平台基础上,建立了成像重建模型,并完成了模拟仿真验证与实验验证。结果表明,所提的远心同-离轴混合数字全息系统能够同时实现振幅图像和相位图像的高分辨率重建,且无需衍射距离等先验知识,从而为同-离轴混合数字全息实现生物细胞组织、空间微粒等高分辨率成像测量应用奠定了理论和实验基础。



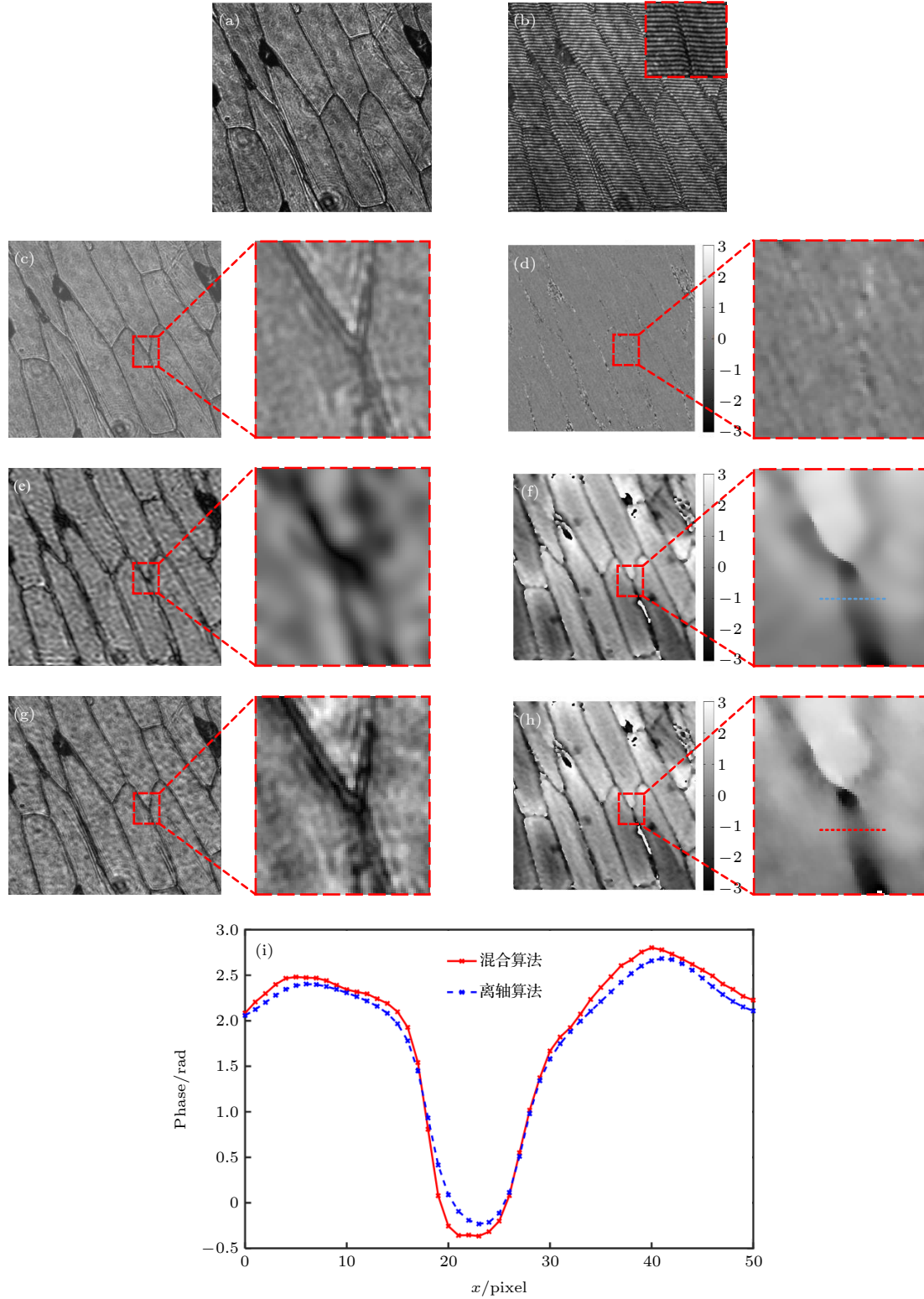


图 9 洋葱表皮细胞实验结果 (a) 同轴全息图; (b) 离轴全息图; (c) 同轴数字全息再现强度像; (d) 同轴数字全息再现相位像; (e) 离轴数字全息再现强度像; (f) 离轴数字全息再现相位像; (g) 混合数字全息再现强度像; (h) 混合数字全息再现相位像; (i) 相位剖面曲线

Fig. 9. Experimental results of onion epidermal cell: (a) In-line hologram; (b) off-axis hologram; (c) amplitude reconstructed image of the in-line hologram; (d) phase reconstructed image of the in-line hologram; (e) amplitude reconstructed image of the off-axis hologram; (f) phase reconstructed image of the off-axis hologram; (g) amplitude reconstructed image of the in-line-and-off-axis hybrid digital holography; (h) phase reconstructed image of the in-line-and-off-axis hybrid digital holography; (i) phase profile curves.



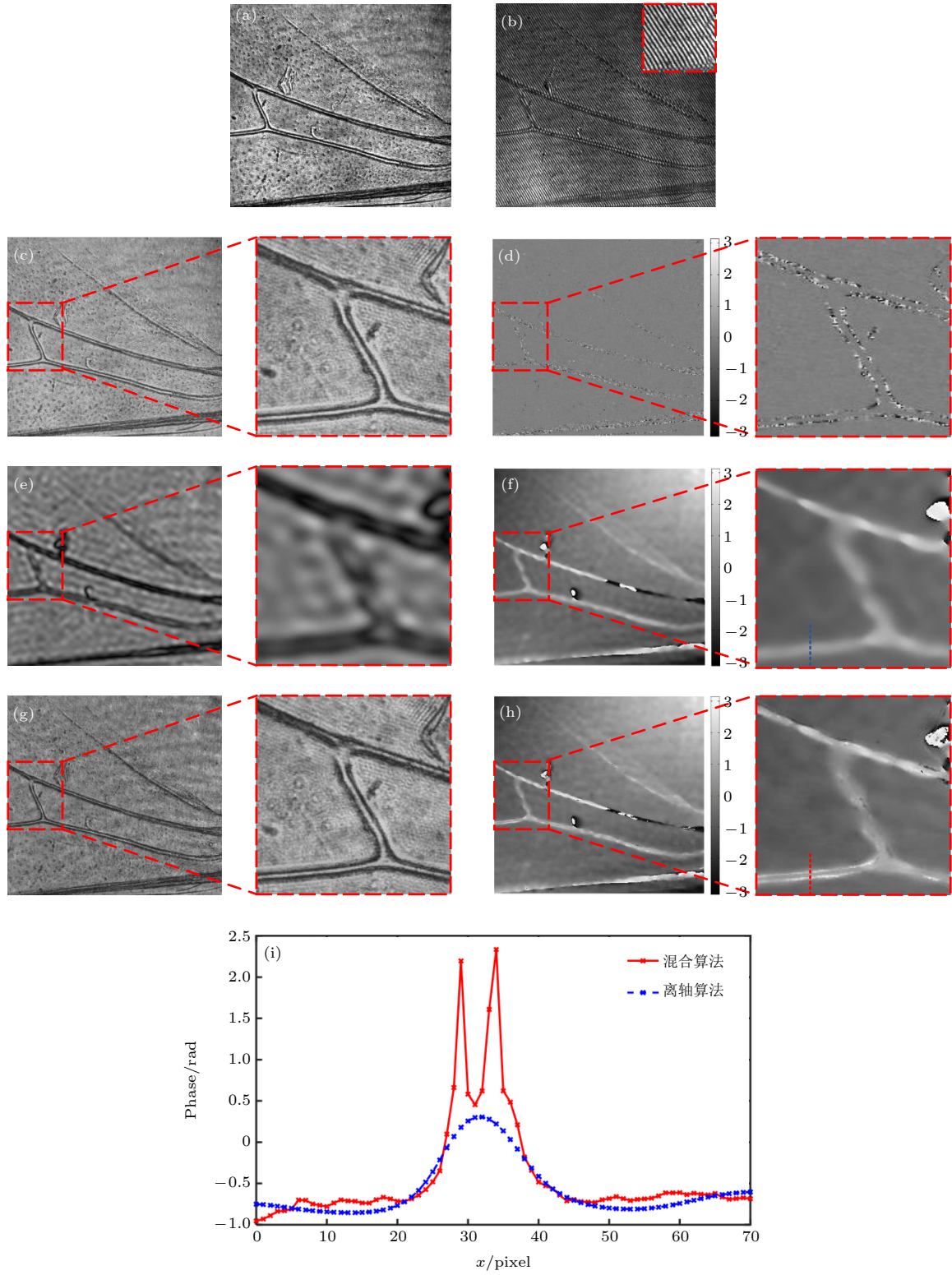


图 10 蜜蜂翅膀实验结果 (a) 同轴全息图; (b) 离轴全息图; (c) 同轴数字全息再现强度像; (d) 同轴数字全息再现相位像; (e) 离轴数字全息再现强度像; (f) 离轴数字全息再现相位像; (g) 混合数字全息再现强度像; (h) 混合数字全息再现相位像; (i) 相位剖面曲线

Fig. 10. Experimental results of bee wings: (a) In-line hologram; (b) off-axis hologram; (c) amplitude reconstructed image of the in-line hologram; (d) phase reconstructed image of the in-line hologram; (e) amplitude reconstructed image of the off-axis hologram; (f) phase reconstructed image of the off-axis hologram; (g) amplitude reconstructed image of the in-line-and-off-axis hybrid digital holography; (h) phase reconstructed image of the in-line-and-off-axis hybrid digital holography; (i) phase profile curves.

## 参考文献

- [1] Schnars U, Juptner W 1994 *Appl. Opt.* **33** 179
- [2] Wang Z, Millet L J, Gillette M U, Popescu G 2008 *Opt. Lett.* **33** 1270
- [3] Aguilar J C, Raul Berriel-Valdos L, Felix Aguilar J 2013 *Opt. Eng.* **52** 104103
- [4] Kemper B, Vollmer A, Rommel C E, Schnekenburger J, Von B G, Biomed J 2011 *J. Biomed. Opt.* **16** 026014
- [5] Zhao W Q, Qiu L R, Xiao Y, Yang J M 2016 *Opt. Express* **24** 22813
- [6] Donnarumma D, Brodoline A, Alexandre D 2016 *Opt. Express* **24** 26887
- [7] Zhang J W, Dai S Q, Ma C J, Di J L, Zhao J L 2017 *Opt. Lett.* **42** 3462
- [8] Yang W J, Liu X J, Lu W L, Guo X T, Popescu G 2018 *Precis. Eng.* **51** 348
- [9] Qiu L R, Wang Y, Wu H X, Sun Y B, Cui H, Zhao W Q, Yuan L, Zhan C L 2018 *Opt. Express* **26** 2314
- [10] Hu C F, Zhu S S, Gao L 2018 *Opt. Lett.* **43** 3373
- [11] Zhou H Q, Wan Y H, Man T L 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 044202 (in Chinese) [周宏强, 万玉红, 满天龙 2018 物理学报 **67** 044202]
- [12] Zhang Y Y, Wu J C, Hao R, Jin S Z, Cao L C 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 164201 (in Chinese) [张益溢, 吴佳琛, 郝然, 金尚忠, 曹良才 2020 物理学报 **69** 164201]
- [13] Liu J Q, Zhu L Q, Zhang F, Dong M L, Qu X H 2019 *Appl. Opt.* **58** 4042
- [14] Wang H Y, Liu F F, Liao W, Song X F, Yu M J, Liu Z Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024207 (in Chinese) [王华英, 刘飞飞, 宋修法, 廖微, 赵宝群, 于梦杰, 刘佐强 2013 物理学报 **62** 024207]
- [15] Cuche E, Marquet P, Depeursinge C 1999 *Appl. Opt.* **38** 6994
- [16] Pham H V, Edwards C, Lynford L G, Popescu G 2013 *Appl. Opt.* **52** A97
- [17] Gao P, Harder I, Nercissian V, Mantel K, Yao B 2010 *Opt. Lett.* **35** 712
- [18] Bai H Y, Shan M G, Zhong Z, Guo L L, Zhang Y B 2015 *Appl. Opt.* **54** 9513
- [19] Yamaguchi I, Zhang T 1997 *Opt. Lett.* **22** 1268
- [20] Oshima T, Matsudo Y, Kakue T, Arai D, Shimobaba T, Ito T 2015 *Opt. Commun.* **350** 270
- [21] Gerchberg R W, Saxton W O 1972 *Optik* **35** 237
- [22] Fienup J 1982 *Appl. Opt.* **21** 2758
- [23] Latychevskaia T, Fink H W 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 233901
- [24] Rong L, Li Y, Liu S, Xiao W, Pan F, Wang D Y 2013 *Opt. Laser Eng.* **51** 553
- [25] Yang G Z, Dong B Z, Gu B Y, Zhuang J Y, Ersoy O K 1994 *Appl. Opt.* **33** 209
- [26] Zhang W H, Cao L C, David J B, Zhang H, Cang J, Jin G F 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 093902
- [27] Orz   L 2015 *Opt. Express* **23** 16638
- [28] Wang F P, Wang D Y, Wang Y X, Rong L, Zhao J 2018 *Chinese Journal of Lasers* **45** 0609001 (in Chinese) [王凤鹏, 王大勇, 王云新, 戎路, 赵洁 2018 中国激光 **45** 0609001]
- [29] Khare K, Ali P T S, Joseph J 2013 *Opt. Express* **21** 5634
- [30] Wu X Y, Yu Y J, Zhou W J 2014 *Opt. Express* **22** 19860
- [31] Zhong M, Cui J, Hyun J S, Pan L, Duan P, Zhang S 2020 *Meas. Sci. Technol.* **31** 085003
- [32] Sanchez-Ortiga E, Ferraro P, Martinez-Corral M 2011 *Opt. Soc. Am. A* **28** 1410
- [33] Zhong Z, Bai H Y, Shan M G, Zhang Y B, Guo L L 2017 *Opt. Laser Eng.* **97** 9
- [34] Hao B G, Shan M G, Zhong Z, Diao M, Wang Y, Zhang Y B 2015 *J. Opt.* **17** 035602

# Telecentric in-line-and-off-axis hybrid digital holographic high-resolution reconstruction method<sup>\*</sup>

Zhong Zhi<sup>1)2)</sup> Zhao Wan-Ting<sup>1)</sup> Shan Ming-Guang<sup>1)2)†</sup> Liu Lei<sup>1)‡</sup>

1) (*College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

2) (*Key Laboratory of Advanced Marine Communication and Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

( Received 26 January 2021; revised manuscript received 18 March 2021 )

## Abstract

In-line digital holography usually employs a phase retrieval algorithm to decouple the phase information but fails to eliminate the unwanted DC and twin image terms when the measured sample does not agree with the sparsity. While the off-axis digital holography can efficiently remove the unwanted image terms but can not reserve the high frequencies of the sample to realize high resolution. The in-line-and-off-axis hybrid digital holography was then developed to provide a relatively high resolution digital holographic imaging without considering the effect of the unwanted terms. In other words, the in-line-and-off-axis hybrid digital holography merges all of the best virtues of the mentioned-above methods in an efficient and elegant way. However, this state-of-the-art method requires prior knowledge about the diffraction distance, which results in time-consuming and low accuracy. In other sense, telecentric technology can realize non-diffractive imaging without the knowledge about the diffraction distance or spherical aberration or defocusing aberration. Therefore, in this paper, a novel in-line-and-off-axis hybrid digital holography is proposed by introducing telecentric imaging architecture, and the corresponding reconstruction method is further proposed by utilizing constrained iterative approach. In this method, telecentric in-line-and-off-axis hybrid digital holography is first used to acquire focused off-axis and in-line holograms, respectively. The low resolution phase information is reconstructed from the off-axis hologram by using Fourier transform method with the help of the sample-free off-axis hologram, and then multiplexed with the amplitude information obtained from the in-line hologram to act as the initial complex amplitude in the iterative recovery process. As a result, constrained iterations are carried out in the spatial domain and frequency domain to realize high resolution and high speed reconstruction. After simulations, we build an experimental setup and demonstrate the operation of the method with USAF resolution target, onion cells and bee wings. Both the simulation and experimental results show that the proposed method can require no prior knowledge to suppress the phase disturbance caused by the unwanted image terms and optical aberrations, resulting in high speed and full utilization of spatial bandwidth product of the digital camera to yield high resolution reconstruction. We hope that the proposed method will have most practical applications in the case where large resolution, high speed and good quality are needed.

**Keywords:** digital holography, telecentric imaging, iterative recovery, high resolution

**PACS:** 42.40.Kw, 42.15.Eq, 07.05.Kf, 87.57.cf

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210190

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61775046), the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, China (Grant No. LC2018027), and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant Nos. 3072021CF0803, 3072021CFJ0801, 3072021CFT0803).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [smgsir@gmail.com](mailto:smgsir@gmail.com)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [liulei2015@hrbeu.edu.cn](mailto:liulei2015@hrbeu.edu.cn)