

数字显微全息重建图像的景深扩展研究

阳静 吴学成 吴迎春 姚龙超 陈玲红 邱坤赞 岑可法

Study on extending the depth of field in reconstructed image for a micro digital hologram

Yang Jing Wu Xue-Cheng Wu Ying-Chun Yao Long-Chao Chen Ling-Hong Qiu Kun-Zan Cen Ke-Fa

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 114209 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.114209

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114209>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种新型光滑粒子动力学固壁边界施加模型

[A new boundary treatment method in smoothed particle hydrodynamics](#)

物理学报.2015, 64(9): 094701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094701>

一类新型激波捕捉格式的耗散性与稳定性分析

[On the accuracy and robustness of a new flux splitting method](#)

物理学报.2015, 64(2): 024702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024702>

基于弱可压与不可压光滑粒子动力学方法的封闭方腔自然对流数值模拟及算法对比

[Comparisons among weakly-compressible and incompressible smoothed particle hydrodynamic algorithms for natural convection](#)

物理学报.2014, 63(22): 224701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224701>

基于浸入式边界方法的串联双矩形柱绕流数值模拟

[Numerical simulation of flow around two elongated rectangles in tandem arrangement using an immersed boundary method](#)

物理学报.2014, 63(21): 214702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214702>

脉动流血液通栓的晶格玻尔兹曼模型

[Effect of pulsation on thrombus studied by the lattice Boltzmann method](#)

物理学报.2014, 63(19): 194701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194701>

## 数字显微全息重建图像的景深扩展研究\*

阳静 吴学成† 吴迎春 姚龙超 陈玲红 邱坤赞 岑可法

(浙江大学能源工程学院, 能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027)

(2014年9月24日收到; 2014年12月12日收到修改稿)

显微物镜的景深问题限制数字显微全息在大纵深视场中的应用. 本文充分利用数值重建的特点, 采取低频和高频系数子图上的最大亮度梯度的局部分方差作为聚焦判据, 在小波分解域内对显微全息重建图像的景深扩展问题进行了研究. 对倾斜的连续物体碳纤维进行三维重建, 分析了重建距离与直径测量误差的关系. 以超声波雾化器生成的微液滴颗粒场为例, 对离散颗粒场的重建图像进行了景深扩展. 利用基于广义洛伦兹-米散射理论的模型分别模拟1—15  $\mu\text{m}$  的非透明与透明离散颗粒的显微全息图, 分析了该方法重建的颗粒场的纵深定位误差与夫琅禾费系数的关系, 对比了非透明与透明颗粒纵深定位误差的异同点. 实验和模拟结果显示该方法对于连续物体和离散颗粒场的显微全息重建图像的景深扩展能力, 且能由此准确重建物体信息.

**关键词:** 数字显微全息, 重建图像, 景深扩展, 倾斜碳纤维**PACS:** 42.30.Wb, 42.40.-i, 42.40.Jv, 87.64.M-**DOI:** 10.7498/aps.64.114209

## 1 引言

显微物镜是观察微观世界不可或缺的工具. 显微成像系统能够提高图像的横向分辨率, 然而这是以牺牲图像的景深为代价的<sup>[1]</sup>. 对于被测物体三维形状复杂<sup>[2-4]</sup>、观测界面相变等三维动态变化过程<sup>[5]</sup>、被测物体与光轴方向倾斜<sup>[4,6,7]</sup>或者其他大纵深的三维视场<sup>[8]</sup>, 往往需要得到视场范围内所有物体聚焦的单张图像. 因此, 扩展图像景深的问题引起了越来越多研究学者的关注. 由此发展出来的方法包括改进显微成像系统的机械布置或者组成元件(例如机械扫描<sup>[9]</sup>、波前编码<sup>[10]</sup>或者综合复用入射光<sup>[11]</sup>等)和扩展显微全息重建图像的景深<sup>[1]</sup>等. 前者会增加系统硬件的复杂度; 而后者充分利用全息数值重建<sup>[12-14]</sup>的特点, 并且具有利用单张记录的全息图实现三维重建<sup>[15,16]</sup>的优点, 受到广泛关注.

全息重建图景深扩展的基本原理是, 先设置合理的纵深间隔, 逐层数值重建全息图, 然后使用视场聚焦判据将重建截面图融合成所需的图像<sup>[1]</sup>.

Bergoënd 等<sup>[2]</sup>研究了单细胞生物的显微全息景深扩展图, 发现基于小波变换的图像清晰度最好. 视场聚焦判据用于识别图像的聚焦信息, 对最后的景深扩展重建结果具有至关重要的作用. 有的聚焦判据基于重建图像的相位信息<sup>[17]</sup>, 也有的基于图像的幅值极值, 比如截面图像的强度梯度<sup>[18]</sup>、灰度方差<sup>[19,20]</sup>和自熵<sup>[21]</sup>等. Wu 等<sup>[20]</sup>从点扩散函数的角度考察重建图像的低频和高频特性, 提取其最大强度局部梯度差作为聚焦判据, 研究了小波域内的普通全息重建图像的景深扩展.

同时, 近些年来已有研究者将显微全息技术从颗粒场推广应用到具有倾斜角的连续物体或者是平面. 这种应用场合为重建衍射光场带来了挑战, 最早由 Leseberg 等<sup>[6]</sup>使用菲涅耳近似算法进行了研究. 随后, De Nicola 等<sup>[7]</sup>基于平面波角谱理论, 使用两次快速傅里叶变换和一次坐标变换, 实现了倾斜物平面在傅里叶域的重建图像的景深扩展. Matrecano 等<sup>[4]</sup>参照白光成像系统, 重建时衍射积分项引入三次相位板, 成功扩展了位于倾斜微通道内细胞的显微全息重建图的景深.

本文旨在运用基于小波变换的景深扩展重建

\* 国家自然科学基金(批准号: 51176162)和国家自然科学基金重大项目(批准号: 51390491)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wuxch@zju.edu.cn

算法, 重构倾斜连续物体和大纵深的离散颗粒场的显微全息, 提高全息重建图的信息聚焦效率. 首先探讨在倾斜的碳纤维实验中, 该重建方法对碳纤维直径的重建效果. 再通过透明的微颗粒场研究该重建方法在微液滴场的适用情况. 最后通过显微全息模拟, 分析该方法对于非透明和透明颗粒以及不同夫琅禾费系数, 颗粒场的纵深定位的相对误差的异同, 为进一步准确重建显微全息提供了参考.

## 2 数字显微全息重建图像的景深扩展理论

### 2.1 数字显微全息

数字显微全息系统可以看成在普通全息系统上引入显微物镜. 被测视场与显微物镜之间存在像平面, 该像平面上的全息图经过显微物镜被放大  $M$  倍后被 CCD 记录, 称为记录的显微全息图 (以下简称记录全息图). 假设  $e$  为 CCD 的像素, 则  $e/M$  称为记录全息图的等效像素. 最后通过数值衍射重建物体的干涉场, 获取物体的速度场 [16,22]、三维位置 [20] 和尺寸大小 [23] 等信息.

令  $I_m(x, y)$  表示记录全息图的光强分布, 平面全息图的光强分布为  $I_h(x_i, y_i)$ , 则两者的关系可以表示成 [22,24]

$$I_h(x_i, y_i) = \frac{1}{M^2} I_m\left(-\frac{x}{M}, -\frac{y}{M}\right). \quad (1)$$

小波变换重建过程与记录全息图等像素, 具有重建图像亮度均匀、效果好等优点. 小波函数可以描述波的传播与衍射过程, 因此显微全息重建可表征成记录全息图和校正的小波子函数  $\Psi_\alpha(x, y)$  的卷积 [13]:

$$\begin{aligned} I(x, y, z) &= 1 - I_m(x, y, z) \otimes \Psi_\alpha(x, y) \\ &= 1 - I_m(x, y, z) \otimes \left\{ \frac{1}{\alpha^2} \left[ \sin\left(\frac{x^2 + y^2}{\alpha^2}\right) - M_\Psi \right] \right. \\ &\quad \left. \times \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\alpha^2 \sigma^2}\right) \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $\sigma$  是带宽因子, 代表窗口函数的宽度, 它依赖于帧采集特性;  $M_\Psi$  称为调零参数, 它使得  $\Psi_\alpha(x, y)$  的平均值为零.

### 2.2 景深和焦深

如图 1 所示, 假设物体  $O$  经过照相机的镜头后聚焦成像于像平面  $P'$ . 根据光学成像原理, 平面

$P'$  上除了有共轭点物平面像  $O'$  之外, 还有位于  $O$  前后视场的物体所形成的弥散像. 当这些弥散像成像清晰时, 例如分别与物体  $O$  相距  $\delta_{w1}$  的  $O_1$  和相距  $\delta_{w2}$  的  $O_2$  的弥散像  $O'_1$  和  $O'_2$ , 物方空间的纵深  $\delta_w$  称为像平面  $P'$  的景深. 类似地, 物体  $O$  还可以成像于距离聚焦像平面  $P'$  为  $\delta_{F1}$  的像平面  $P''$  或者距离为  $\delta_{F2}$  的像平面  $P'''$ , 当成像清晰时, 像方空间的纵深  $\delta_F$  称为物体  $O$  所在物平面的焦深. 当物像比为 1 时, 景深等于焦深 [25]. 本文所研究的是利用单张全息图, 通过改进的重建方法, 扩展全息重建图像的景深, 达到重现大纵深视场的目的.

令  $\lambda$  为入射光波长,  $n$  为物镜与元件之间的折射率, NA 为显微物镜的数值孔径, 则显微物镜观察的景深为 [26]

$$\delta_w = \frac{1}{NA} \left( \frac{n \cdot \lambda}{NA} + \frac{n \cdot e}{M} \right). \quad (3)$$

数字显微全息系统的景深不仅与显微系统有关, 还与参考光源的布置有关 [27]. 一般而言, 显微全息单次曝光能够记录的景深约为十几个微米 [25]; 高放大倍率的显微全息系统成像景深较小 [1].

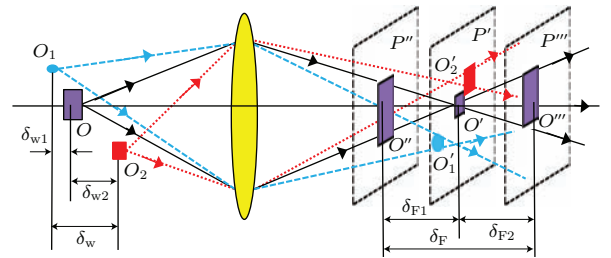


图 1 (网刊彩色) 成像系统的景深和焦深

Fig. 1. (color online) Depth of field and depth of focus of an imaging system.

### 2.3 基于小波变换的景深扩展重建的全息图处理

本文采用基于小波变换的重建算法, 扩展全息重建图的景深, 具体步骤如图 2 所示.

第一步, 运用小波变换对记录全息图 (图 2(a)) 进行重建, 在视场不同纵深位置重建出系列局部聚焦的全息图 (图 2(b)). 全息的重建距离和采样间隔各需要满足以下条件: 1) 最小重建距离小于最小全息记录距离, 最大重建距离大于最大全息记录距离, 以使得整个样本空间都能够得以重建; 2) 采样间隔小于显微物镜的景深范围 (由 (3) 式求得).

第二步, 对重建图像进行小波分解 [20], 如图 2(c) 所示. 用 H 表示高频, L 表示低频, 则获得的各图的四张高低频子图像分别是: HH, HL, LH

和LL. 它们分别代表重建图像的对角线高频、水平高频、竖直高频和低频系数.

第三步, 基于区域的图像景深扩展重建算法得到物体的景深扩展全息图, 重建图像使得所测物体均聚焦, 如图2(d)所示. 引入索贝尔算子  $S_x$  对小波分解子图进行边缘检测, 则子图像的梯度矢量  $\mathbf{G}$  可在  $x, y$  方向分别表示为<sup>[20]</sup>

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_{(x,h)} &= \text{HL} \otimes S_x + \text{HH} \otimes S_x, \\ \mathbf{G}_{(y,h)} &= \text{LH} \otimes S'_x + \text{HH} \otimes S'_x, \\ \mathbf{G}_{(x,l)} &= \text{LL} \otimes S_x, \\ \mathbf{G}_{(y,l)} &= \text{LL} \otimes S'_x. \end{aligned} \quad (4)$$

再以  $n \times m$  区域的高低频子图像的最大亮度

梯度  $\mathbf{G}$  的局部方差作为融合图像的聚焦判据, 对重建图像进行景深扩展:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{h,z} &= \sum_n \sum_m [\mathbf{G}_h(n, m) - \overline{\mathbf{G}_h(n, m)}]^2, \\ \varepsilon_{l,z} &= \sum_n \sum_m [\mathbf{G}_l(n, m) - \overline{\mathbf{G}_l(n, m)}]^2. \end{aligned} \quad (5)$$

第四步, 首先选取合适的灰度阈值对全息图进行二值化, 将物体从背景中识别出来. 如果该灰度阈值过小, 则会误识灰度较大的背景为物体; 如果该灰度阈值太大, 则会误弃灰度小于阈值的物体为背景. 然后基于重建图像的颗粒灰度以及面积<sup>[28]</sup>, 计算物体的位置和粒径等的分布, 如图2(e)所示.

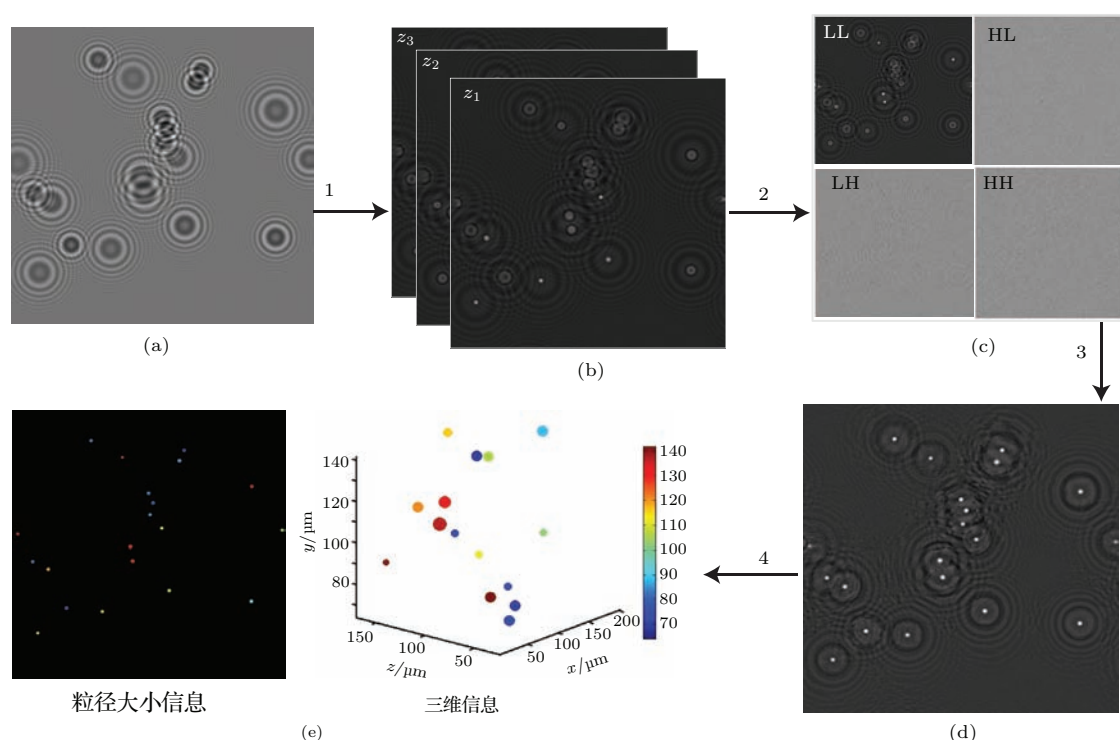


图2 (网刊彩色) 基于景深扩展的全息图处理步骤 (a) 记录全息图; (b) 多张重建截面图; (c) 高低频子图像; (d) 景深扩展后的全息重建图; (e) 物体信息图

Fig. 2. (color online) Process procedure for holograms based on extending the depth of field: (a) recorded hologram; (2) multiple reconstructed planes; (3) high- and low-frequency sub-images; (d) reconstructed hologram by extending the depth of field; (e) images of the information of the object.

### 3 实验和模拟结果

#### 3.1 数字显微全息实验与结果

##### 3.1.1 数字显微全息实验系统

图3为构建的数字显微全息系统示意图, 并应用该系统分别对倾斜的连续物体碳纤维和离散颗粒场微液滴场进行测量. Nd : YAG 激光器发射波

长为 532 nm 的激光, 激光经过光学元件准直、衰减和扩束等系列变换之后, 部分激光照射到倾斜角为  $\theta$  的碳纤维或者微液滴场上衍射出物光, 另外部分激光作为参考光而直接经过显微物镜到达 CCD. 物光与参考光相干形成全息干涉条纹, 由像素分辨率为  $1352 \times 1248$  的记录元件 CCD 记录并传输到数据处理器. 其中, 连续物体使用的显微物镜的放大倍数为 10 倍, 数值孔径为 0.25; 离散颗粒场使



用的显微物镜的放大倍数为20倍, 数值孔径为0.4; CCD的像素为7.4  $\mu\text{m}$ .

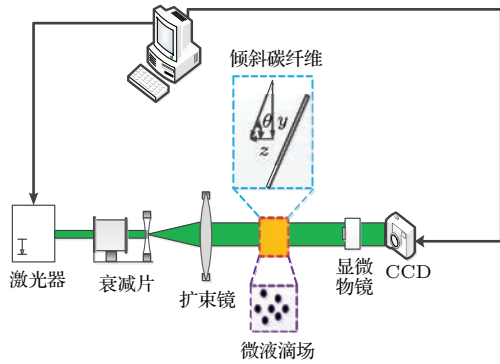


图3 显微全息实验装置示意图

Fig. 3. Experimental setup sketch of micro holography.

### 3.1.2 连续物体实验分析

以碳纤维为例, 对连续物体的实验显微全息图进行景深扩展. 采用单丝直径为11  $\mu\text{m}$ 的碳纤维, 碳纤维与光轴的夹角为 $\theta = 75^\circ$ . 经标定, 显微全息系统的放大倍数为13.2倍, 记录全息图的等效像素是0.56  $\mu\text{m}$ , 测量区域为757  $\mu\text{m} \times 699 \mu\text{m}$ , 对应的碳纤维的测量深度约为200  $\mu\text{m}$ .

图4(a), (b), (c)分别是倾斜碳纤维的记录全息图、小波重建图和景深扩展重建图像, 红色边框内是碳纤维聚焦区域; 图4(a), (b), (c)下方对应的是三张图像径向截面处的图像亮度分布图. 由于碳纤维各部分到CCD的距离从左到右逐渐增加, 其

全息图条纹频率从左到右逐渐减小, 如图4(a)所示. 接着利用小波变换重建倾斜碳纤维的全息截面图, 纵向采样间隔设置为1  $\mu\text{m}$ , 共重建301个截面. 图4(b)所示为重建距离 $z = 643 \mu\text{m}$ 的重建截面图, 只有小范围碳纤维聚焦, 图像的景深非常小. 利用上文介绍的景深扩展重建算法对重建的多张图像进行景深扩展处理, 如图4(c)所示, 图中碳纤维图像清晰, 均处于聚焦状态, 表明重建图像的景深得到了扩展. 图4(a)以及图4(b)中的右侧截面图像处于离焦状态, 而图4(b)的左侧图像和图4(c)中所有图像处于聚焦状态. 从亮度强度分布图可以看出, 对于图4(a)和图4(b)的离焦位置, 该部分图像具有中间高亮、缓慢平滑下降到背景的特点; 而对于图4(b)的聚焦位置和图4(c), 图像均匀高亮, 且在边沿处有一个大的亮度梯度并且急剧下降到背景区域.

图5是根据重建图像处理得到的碳纤维的三维显示, 图中碳纤维的颜色与其 $z$ 轴位置成比例.  $z$ 轴读数表明该实验中小波域内景深扩展重建算法将合成的重建图像景深大小为200  $\mu\text{m}$ .

为了考察重建图像质量, 对碳纤维的测量直径进行误差分析. 将对应的碳纤维的重建距离 $z = 598\text{--}798 \mu\text{m}$ 等分为八段, 以每段的碳纤维面积与长度之比作为碳纤维的直径<sup>[29]</sup>. 以每段左端点的重建距离值作为横坐标, 直径测量值或者直径测量误差作为纵坐标, 见图6中柱状图; 以相对

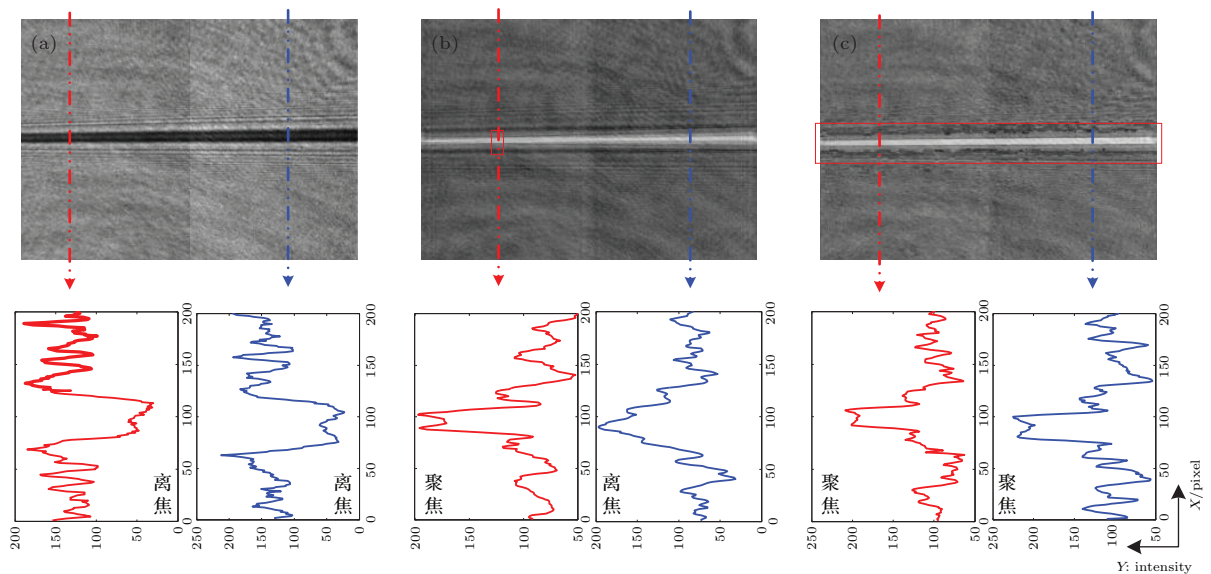


图4 (网刊彩色) 倾斜碳纤维全息图、重建图以及对应截面的图像亮度曲线 (a) 记录全息图; (b) 小波重建图; (c) 景深扩展重建图

Fig. 4. (color online) Recorded holograms, reconstructed holograms and image intensity curve of the corresponding cross-sections of a tilted carbon fiber: (a) recorded hologram; (b) reconstructed hologram plane by wavelet; (c) reconstructed hologram with the depth of field extended.

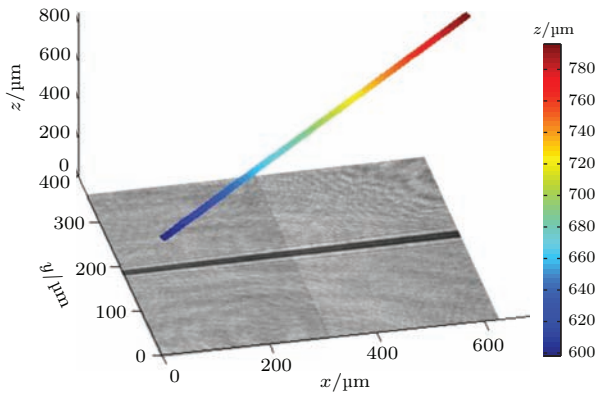


图5 (网刊彩色) 倾斜碳纤维的三维重建  
Fig. 5. (color online) Three-dimensional reconstruction of the tilted carbon fiber.

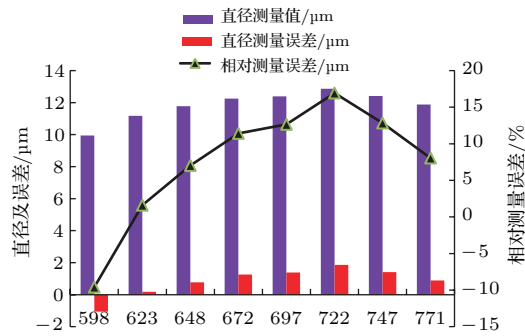


图6 (网刊彩色) 倾斜碳纤维的重建距离与直径测量值、测量误差和相对误差  
Fig. 6. (color online) Reconstruction distances with diameters measured, absolute measurement errors and relative measurement errors of the tilted carbon fiber.

测量误差作为右纵坐标, 见图6中折线图. 经计算, 平均直径测量值为11.84 μm, 标准差为0.917 μm, 平均测量误差为7.66%. 直径测量误差以重建距离在623—648 μm时最小, 最小误差值为0.17 μm, 最小测量误差为1.60%; 最大测量误差为1.86 μm, 位于重建距离为722—747 μm处, 最大相对误差为16.93%. 可见基于小波变换的景深扩展重建算法能够有效地重建倾斜的连续物体的显微全息图, 并且直径测量误差较小.

### 3.1.3 离散颗粒场实验分析

以微液滴场为例, 对离散颗粒场的数字显微全息进行景深扩展. 实验采用超声波雾化器产生粒径分布在2—4 μm的去离子水滴. 经标定, 显微全息系统的放大倍数为35.4倍, 记录全息图的等效像素为0.209 μm, 测量区域大小为338 μm × 255 μm. 由于相机边缘、灰尘等施加的衍射噪声, 使得记录全息图信噪比较低. 平均多张连续拍摄的全息图获得背景图, 对记录全息图进行背景去噪处理, 最终得到的去除背景后的全息图, 如图7(a)所示, 信噪比得到了大大的提高. 经过小波变换重现重建距离  $z = 945 \mu\text{m}$  的全息截面图, 如图7(b)所示, 只有少数颗粒在重建截面图中聚焦. 经过景深扩展重建后得到图7(c)的重建图, 视场中的颗粒均得以重建. 进而对重建图进行颗粒识别和提取, 获取了颗粒场

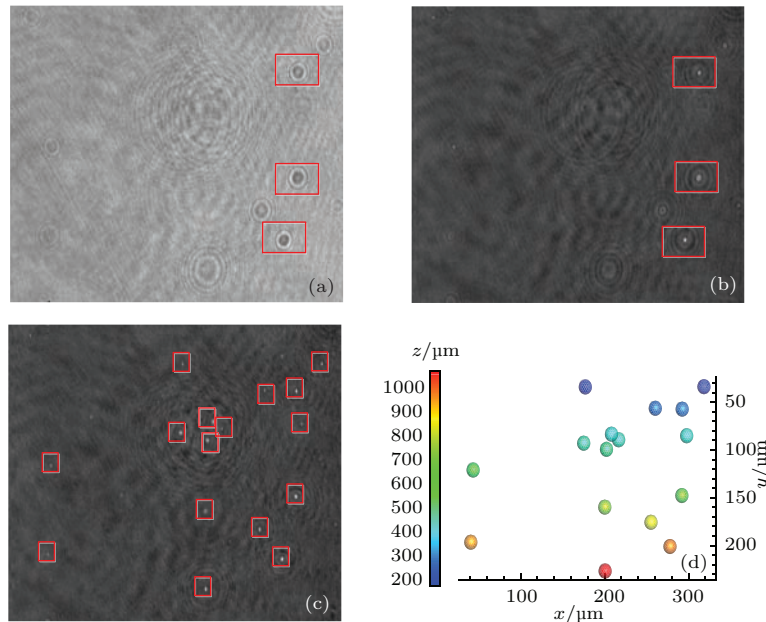


图7 (网刊彩色) 微液滴显微全息实验结果 (a) 去除背景噪声后全息图; (b) 小波重建图; (c) 景深扩展重建图; (d) 颗粒信息图  
Fig. 7. (color online) Experimental results of micro holography for micro droplets: (a) hologram subtracted from background noise; (b) reconstructed hologram by wavelet; (c) reconstructed hologram by extending the depth of field; (d) particle information image.

的三维位置信息,如图7(d)所示,重建颗粒与记录全息图上的颗粒能够完全对应,同时, $z$ 轴读数表明位于170—949  $\mu\text{m}$ 的纵深范围内的颗粒均得以聚焦,即有效景深大小为779  $\mu\text{m}$ .本实验表明,该景深扩展重建算法对大纵深的离散颗粒场能够进行有效重建和识别.

### 3.2 离散颗粒场显微全息模拟

为研究本景深扩展重建算法的纵深定位的准确程度,应用基于广义洛伦兹-米散射理论的颗粒全息模型<sup>[30,31]</sup>,模拟得到颗粒的显微全息图,具体探讨纵深定位的相对误差大小与颗粒透光性、颗粒粒径 $d$ 和全息记录距离 $z$ 之间的关系,其中 $d$ 和 $z$ 与误差的关系用夫琅禾费系数表征: $C_F = \pi d^2 / (4\lambda z)$ .该颗粒全息模型计算程序可以精确控制颗粒三维位置、粒径、折射率以及相机像素尺寸等参数,通过计算颗粒的散射场和其与参考光的干涉场,模拟产生颗粒的显微全息图.为模拟非透明颗粒和透明颗粒的全息图,取非透明颗粒的折射率为 $1.33 - 0.5i$ ,透明颗粒的折射率为 $1.33 - 0i$ .CCD的记录距离设为45—160  $\mu\text{m}$ 之间,等效像素为0.2  $\mu\text{m}$ .前人的研究<sup>[28]</sup>表明:显微全息的颗粒粒径在不小于2.2个像素时能够达到较理想的测量精度.因此本模拟中颗粒的粒径范围设置为1—15  $\mu\text{m}$ .成像区域 $x \times y \times z$ 为160  $\mu\text{m} \times 160 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ .使用该重建算法对颗粒进行景深扩展重建并且识别颗粒之后,采用最近邻算法与模拟的三维位置和粒径信息进行匹配,以计算本重建算法的纵深定位的绝对误差和相对误差.

以 $d = 2-3 \mu\text{m}$ 的非透明颗粒的全息图为例,给出记录全息图与重建计算得到的三维位置图和颗粒信息图,如图8所示.图中颗粒的不同颜色代表颗粒的粒径大小,颗粒的全息记录距离可从 $z$ 轴中读出.从图中可以看出,模拟生成的记录全息图信噪比高,且接近实际实验图片,重建计算得到的颗粒三维位置信息准确,能够与记录全息图很好地对应起来.

图9(a)和(b)分别是 $d = 1-15 \mu\text{m}$ 颗粒经过景深扩展重建之后的纵深定位的绝对误差和相对误差与夫琅禾费系数的关系图.图中黑色数据点代表非透明颗粒,红色数据点代表透明颗粒.可以看出,随着 $C_F$ 数的增大,颗粒的绝对和相对误差均呈现增大的趋势,以非透明颗粒的波动幅度为大;非透明颗粒在 $C_F < 1$ 时,相对误差小于20%;透明颗粒的相对误差则基本上小于10%.这可能是因为记

录距离比较近,透明颗粒的前向散射光场大于不透明颗粒,再加之显微物镜的放大作用,加大了纵深定位的相对误差以及两者误差的相对大小.

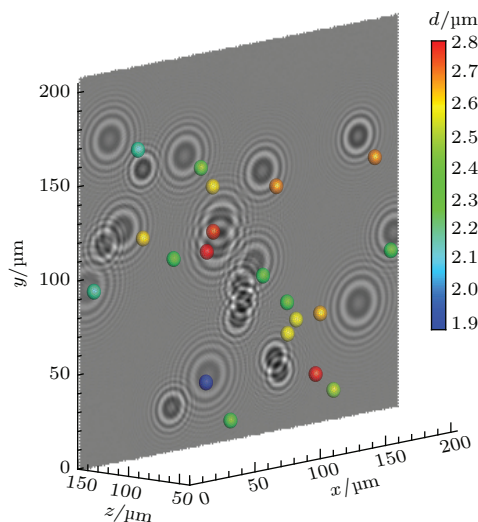


图8 (网刊彩色)  $d = 2-3 \mu\text{m}$ 的非透明颗粒场的模拟全息图和三维重建

Fig. 8. (color online) Simulated holograms and three-dimensional reconstruction of opaque particle field with  $d = 2-3 \mu\text{m}$ .

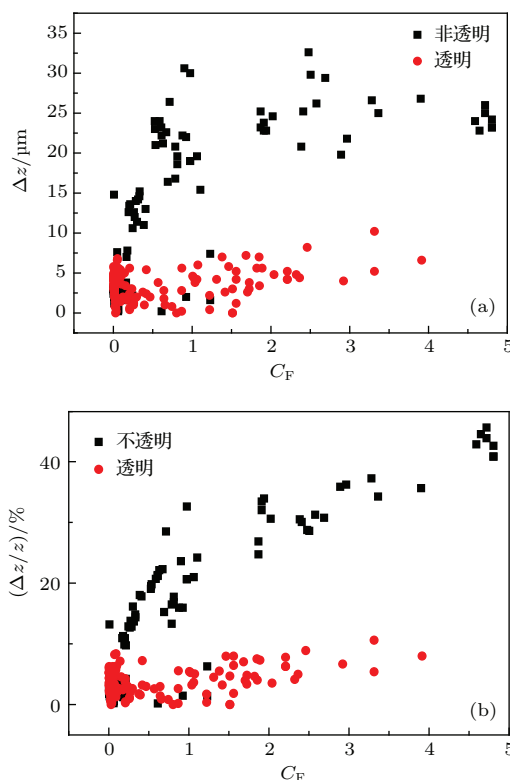


图9 (网刊彩色) 模拟颗粒场景深扩展重建的纵深定位误差 (a) 绝对误差; (b) 相对误差

Fig. 9. (color online) Errors of rebuilt longitudinal locations of simulated particle field by extending the depth of field: (a) absolute errors; (b) relative errors.



本模拟结果表明,本重建算法对非透明和透明颗粒的显微全息均适用,并且对于 $d = 1\text{--}15\ \mu\text{m}$ 、全息记录距离 $z = 45\text{--}160\ \mu\text{m}$ 的颗粒,非透明颗粒在 $C_F < 1$ 时重建结果较好,透明颗粒场在该粒径和记录距离范围内的重建效果则相对更好。

## 4 结 论

本文重点研究数字显微全息重建图像在小波域内的景深扩展问题.采用低频系数和高频系数子图上的最大亮度梯度的局部方差作为聚焦判据,在重建截面的逐层小波分解域内进行融合,获得扩展景深的重建图像.分别对倾斜度为 $75^\circ$ 的碳纤维和大纵深的微液滴场的实验显微全息进行重建,说明本景深扩展重建方法可以运用到倾斜的连续物体以及离散颗粒场的显微全息,并且根据重建图像计算得到的碳纤维平均直径误差为7.66%,微液滴场重建图像的景深扩展到 $779\ \mu\text{m}$ .基于广义洛伦兹-米散射理论模拟颗粒的显微全息图,分别探讨了非透明和透明颗粒的纵深定位的绝对误差和相对误差,结果表明随着夫琅禾费系数的增加,两者的绝对误差和相对误差也增加.综上所述,本景深扩展重建方法为大纵深视场的数字显微全息提供了一种有利的重现工具.

下一步研究工作在于改进景深扩展重建算法,缩短图片处理过程,实现真正的实时三维测量.

## 参考文献

- [1] Matrecano M, Paturzo M, Ferraro P 2014 *Opt. Eng.* **53** 112317
- [2] Bergoënd I, Colomb T, Pavillon N, Emery Y, Depoursing C 2009 *Conference on Modeling Aspects in Optical Metrology II* Munich, Germany, June 15–16, 2009 p73901C
- [3] Zhang Y Z, Wang D Y, Wang Y X, Tao S Q 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 114209
- [4] Matrecano M, Paturzo M, Finizio A, Ferraro P 2013 *Opt. Lett.* **38** 896
- [5] Wang J, Zhao J L, Di J L, Rauf A, Yang W Z, Wang X L 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 173106
- [6] Leseberg D, Frère C 1988 *Appl. Opt.* **27** 3020
- [7] De Nicola S, Finizio A, Pierattini G, Ferraro P, Alfieri D 2005 *Opt. Exp.* **13** 9935
- [8] Gao X, Li C, Fang G Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 028401
- [9] Xie H M, Wang Q H, Kishimoto S, Dai F L 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 103511
- [10] Wang J G, Bu J, Wang M W, Yang Y, Yuan X C 2012 *Opt. Lett.* **37** 4534
- [11] Wu Y L, Yang Y, Zhai H C, Ma Z H, Ge Q, Deng L J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084203 (in Chinese) [吴永丽, 杨勇, 翟宏琛, 马忠洪, 盖琦, 邓丽军 2013 物理学报 **62** 084203]
- [12] Chen L P, Lue X X 2009 *Chin. Phys. B* **18** 189
- [13] Wu X C, Wu Y C, Zhou B W, Wang Z H, Gao X, Grehan G, Cen K F 2013 *Appl. Opt.* **52** 5065
- [14] Hua L L, Xu N, Yang G 2014 *Chin. Phys. B* **23** 064201
- [15] Shen G X, Wei R J 2005 *Opt. Laser. Eng.* **43** 1039
- [16] Lu Q N, Chen Y L, Yuan R, Ge B Z, Gao Y, Zhang Y M 2009 *Appl. Opt.* **48** 7000
- [17] Ferraro P, Grilli S, Alfieri D, De Nicola S, Finizio A, Pierattini G, Javid B, Coppola G, Striano V 2005 *Opt. Exp.* **13** 6738
- [18] Yu L F, Cai L L 2001 *J. Opt. Soc. Am. A* **18** 1033
- [19] Ma L H, Wang H, Li Y, Jin H Z 2004 *J. Opt. A* **6** 396
- [20] Wu Y C, Wu X C, Yang J, Wang Z H, Gao X, Zhou B W, Chen L H, Qiu K Z, Grehan G, Cen K F 2014 *Appl. Opt.* **53** 556
- [21] Chen W, Quan C, Tay C J 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 201103
- [22] Wu Y C, Wu X C, Wang Z H, Grehan G, Chen L H, Cen K F 2011 *Appl. Opt.* **50** H297
- [23] Wu X C, Grehan G, Meunier-Guttin-Cluzel S, Chen L H, Cen K F 2009 *Opt. Lett.* **34** 857
- [24] Sheng J, Malkiel E, Katz J 2006 *Appl. Opt.* **45** 3893
- [25] Wang H Y, Zhang Z H, Liao W, Song X F, Guo Z J, Liu F F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 044208 (in Chinese) [王华英, 张志会, 廖薇, 宋修法, 郭中甲, 刘飞飞 2012 物理学报 **61** 044208]
- [26] Meinhardt C D, Wereley S T, Gray M H B 2000 *Meas. Sci. Technol.* **11** 809
- [27] Li J C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134203 (in Chinese) [李俊昌 2012 物理学报 **61** 134203]
- [28] Wu X C, Pu X G, Pu S L, Yuan Z F, Cen K F 2009 *J. Chem. Ind. Eng.* **60** 310 (in Chinese) [吴学成, 浦兴国, 浦世亮, 袁镇福, 岑可法 2009 化工学报 **60** 310]
- [29] Malek M, Coëtmelec S, Allano D, Lebrun D 2003 *Opt. Commun.* **223** 263
- [30] Wu Y, Wu X, Saengkaew S, Meunier-Guttin-Cluzel S, Chen L, Qiu K, Gao X, Grehan G, Cen K F 2013 *Opt. Commun.* **305** 247
- [31] Xu F, Ren K F, Cai X S 2006 *Appl. Opt.* **45** 4990



# Study on extending the depth of field in reconstructed image for a micro digital hologram\*

Yang Jing Wu Xue-Cheng<sup>†</sup> Wu Ying-Chun Yao Long-Chao Chen Ling-Hong  
Qiu Kun-Zan Cen Ke-Fa

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, School of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

( Received 24 September 2014; revised manuscript received 12 December 2014 )

## Abstract

Digital micro holography offers an in-situ, non-contact and three-dimensional way to explore the microscopic world. However, as it is difficult to focalize the whole object in one single reconstructed image, the application of digital micro holography to cases with a large longitudinal object volume is limited by the microscope's depth of field. By extending the depth of field in reconstructed micro holograms in the wavelet domain, this paper fully takes advantage of numerical reconstruction algorithms to solve this problem. First, a recorded hologram is rebuilt using the wavelet transform approach by setting up an appropriate longitudinal interval to obtain a series of reconstructed hologram planes. Then each plane is decomposed with wavelet into its sub-images of both high and low frequencies. Furthermore, the local variance of the maximum intensity gradients of the high- and low-frequency coefficients is calculated and utilized as the focus criterion. Finally, the image planes are fused into a single one with the depth of field extended to a large extent. The feasibility and robustness of this reconstruction procedure for both continuum and particle fields are investigated. One of the demonstrations is made in an experiment of a tilted continuum: carbon fiber. It is different from most of the previous applications where the interrogated is the particles and where the area involved is parallel to the CCD. The carbon fiber gets successfully reconstructed in three dimensions, and the measurement errors of its diameter are presented together with the reconstruction distances. Another is an experiment of a dispersed particle field: micro transparent particles are generated by an ultrasonic atomizer, for which the reconstruction procedure achieves an extended depth of field. In addition, a numerical model based on generalized Lorenz-Mie theory is used to simulate the holograms of both opaque and transparent particles of 1–15  $\mu\text{m}$  in diameter. Variations of the longitudinal location errors with the Fraunhofer number are analyzed, and comparisons are made between the results of opaque and transparent particles. Both the experimental and simulation outcomes show that this reconstruction procedure is a reliable one to acquire an extended-depth-of-field hologram for both the continuum and the dispersed particle fields, and then to accurately measure the objects.

**Keywords:** digital micro holography, reconstructed image, extend the depth of field, tilted carbon fiber

**PACS:** 42.30.Wb, 42.40.-i, 42.40.Jv, 87.64.M-

**DOI:** [10.7498/aps.64.114209](https://doi.org/10.7498/aps.64.114209)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51176162), and the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51390491).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [wuxch@zju.edu.cn](mailto:wuxch@zju.edu.cn)