

基于红外光照明的数字全息粒子场成像(特邀)

苏萍^{1*}, 周柏臻¹, 郝治涛¹, 马建设¹, 任振波^{2,3}¹清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055;²西北工业大学物理科学与技术学院, 陕西 西安 710072;³西北工业大学深圳研究院, 广东 深圳 518063

摘要 在数字全息粒子场成像中, 粒子衍射的孔径角很小, 重构时具有很长的焦深, 造成轴向定位精度远低于横向定位精度。增大照明波长, 相当于增大粒子孔径角, 因此可得到更高的轴向定位精度。采用红外相干光源照明粒子场, 在不提升算法和系统复杂度的前提下提升数字全息粒子场重构的轴向定位精度。从理论上分析数字全息粒子场重构中焦深与轴向定位精度的关系, 并分别仿真分析绿光、红光及红外光照明时的粒子场全息重构, 分别开展了基于这三种光源的聚苯乙烯微球粒子场全息成像实验。仿真和实验结果研究表明, 相比红光, 红外光源使焦深减小了约 19%, 而相比绿光, 焦深减小了约 39%。增加波长可以减弱离焦像的层间干扰, 从而提高了轴向定位精度。

关键词 数字全息; 粒子场; 红外光; 轴向定位精度

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232218

Digital Holographic Particle Field Imaging Based on Infrared Illumination(Invited)

Su Ping^{1*}, Zhou Bozhen¹, Hao Zhitao¹, Ma Jianshe¹, Ren Zhenbo^{2,3}¹Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, Guangdong, China;²School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;³Shenzhen Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Shenzhen 518063, Guangdong, China

Abstract In digital holographic particle field imaging, the small aperture angle of particle diffraction results in an increased depth of focus during reconstruction. This leads to a significantly lower axial positioning accuracy compared with lateral positioning accuracy. Therefore, higher axial positioning accuracy can be achieved by increasing the illumination wavelength, which is equivalent to increasing the particle aperture angle. This study proposes the use of infrared coherent light source to illuminate the particle field to improve the axial positioning accuracy of digital holographic particle field reconstruction without increasing the complexity of algorithms and systems. This study theoretically analyzes the relationship between focal depth and axial positioning accuracy in digital holographic particle field reconstruction. Simulation and analysis of holographic particle field reconstruction are conducted under green, red, and infrared light illumination. Moreover, holographic imaging experiments of polystyrene microsphere particle field based on these three light sources are performed. The simulation and experimental results show that compared with red and green lights, the infrared light source reduces the focal depth by approximately 19% and 39%, respectively. Also, increasing the wavelength weakens the interlayer interference of defocused images, thereby improving axial positioning accuracy.

Key words digital holography; particle field; infrared light; axial positioning accuracy

1 引言

由气泡、液滴、气溶胶、生物细胞或其他小物体组

成的粒子场在众多科学领域都得到广泛研究, 精确测量粒子场具有十分重要的意义。在环保领域, 微塑料颗粒物不易被降解, 可通过被低级微生物摄食而进入

收稿日期: 2023-10-07; 修回日期: 2023-11-04; 录用日期: 2023-11-27; 网络首发日期: 2023-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(62275218)、中国博士后科学基金(2022M712586)、广东省基础与应用基础研究基金(2023A1515011335)、中央高校基本科研业务费(D5000230117)

通信作者: *su.ping@mail.sz.tsinghua.edu.cn

生物链,继而通过食物链传播,在高等生物体内富集,产生健康危害。因此,监测由微塑料组成的粒子场在食品安全方面有重要意义。雾霾通常是由多种污染源混合形成的,其中可吸入颗粒物会沉积于上、下呼吸道和肺泡中,对呼吸系统造成伤害,因此对雾霾场进行测量对环境质量监测非常重要。在燃烧领域,液体燃料雾化后液滴的大小、固体燃料研磨后固体颗粒的尺寸不仅影响燃烧的效率,还影响生成的化合物种类。对燃料的粒度进行测量可以评价燃料质量;对燃烧场中的颗粒物进行测量可以评价燃烧效率。在火箭发动机设计和测试时,发动机喷嘴处的颗粒速度、尺寸和运动轨迹是评价发动机性能的重要数据依据。在过去几十年里,三维成像在流体动力学、环境科学、化学工程、材料科学、生物学、医学等领域得到广泛应用,用来测量颗粒尺寸、形状、位置和运动状态^[1]。数字全息有一次曝光记录三维空间所有颗粒信息的独特优势,近年来很多专家学者从事关于数字全息在粒子场的轴向定位精度方面的研究^[2-5]。

粒子的三维位置坐标是粒子场重构时的重要参数。Murata 等^[6]于 2000 年阐述了数字全息在粒子场测量中的巨大潜力,并且使用计算机对观察到的全息图进行了数值重建,根据再现像强度对粒子的深度进行了提取,实验轴向误差在 1 mm 以内。同年 Buraga-Lefebvre 等^[7]将衍射理论与信号处理中的小波变换结合,将衍射过程解释为一系列小波变换的卷积,小波函数的参数与轴向距离有关,可以通过搜索尺度参数的最佳值来重构物体。因此该方法的轴向定位精度达到了 50 μm 。2002 年, Sun 等^[8]使用全息技术观测了水流对岩石的侵蚀作用,方法的轴向定位精度大约为 250 μm 。以上方法都是通过重建粒子在轴向的强度分布找到最大强度点的,再将其作为粒子的轴向位置,这种方法称为最大强度轴向定位方法,该方法使用实数图像,考察的范围往往只是围绕粒子的一个较小的平面范围,这个方法因为判断指标较为简单而鲁棒性较差。由于粒子的孔径角很小,重构时粒子的像在轴向有较长的能量分布,使轴向定位精度远远小于横向定位精度。因此,提升轴向定位精度是数字全息粒子场重建技术的重要研究方向。Meng 课题组^[9-10]对数字全息应用于粒子场测量时的噪声干扰问题进行了研究,发现数值重建处于在焦位置时,聚焦的粒子的复振幅虚部会消失,提出了使用复振幅进行粒子轴向定位的方案^[11],实验证实,该方法相比最大强度轴向定位方法显著提高了粒子的轴向定位能力,在粒子浓度为 6 个/ μL 时,平均轴向定位误差为 6.9 μm ;在粒子浓度为 18 个/ μL 时,平均轴向定位误差为 12.8 μm 。该方案使用复数图像,操作繁琐,计算量大,而且对不同情况下的不同图像,表现效果并不一致,故目前大多数聚焦准则并没有采用这种方法。2006 年, Choo 等^[12]提出了一种基于粒子特征分析粒子轴向位置的方法,该方

法提出了 3 种分析准则,即相关系数法、锐度索引法、深度强度法,对不同大小的粒子应用不同的准则判据,结果显示,对于位置在 322 mm 处的粒子,轴向的定位误差在 $\pm 30 \mu\text{m}$ 内。但是该方法针对不同粒径大小的粒子需要更换不同的准则判据,而且相应的准则判据计算起来较为繁琐,数据处理量比较大。2009 年, 钟杰等^[13]探究了红外激光对同轴全息法测量粒子场时的影响,结果表明红外激光可以将小粒子的再现像放大,信息光增强,因此对小尺寸、高密度粒子场的实验诊断具有一定的优势。但该工作仅从现象上论述了结果,没有理论分析原因,也未论述长波对定位精度的作用。2020 年,本课题组^[14]使用压缩感知技术对轴向定位进行了研究,能够分辨出轴向距离为 36.4 μm 与 48.5 μm 的交叉纤维。同年,本课题组^[15]使用压缩全息技术重建 3D 粒子场,最大轴向定位误差为 71.3 μm 。压缩全息重建方法可以消除共轭像的干扰,使粒子像的焦深几乎等于粒子直径的重建像,使轴向定位精度与横向分辨率相等。但压缩全息是一种迭代算法,十分耗时。在不提升算法和系统复杂度的前提下,提升数字全息粒子场重建的轴向定位精度具有重要的意义。

通过理论研究可知增加波长相当于增加粒子孔径角,因此可以减小粒子像的焦深。据此,本文提出了一种基于红外光照明的数字全息成像方法,该方法通过更换长波光源提升轴向定位精度,不需要额外的繁琐耗时的算法。文章从原理上分析了照明光波长对全息成像系统的影响,对红外光照明的同轴粒子全息进行了仿真,搭建了相应的成像系统,并进行了聚苯乙烯球粒子场成像实验,重建了三维粒子场,分析了相关的参数。

2 基本原理

2.1 基于数字全息的粒子场测量

同轴数字全息成像系统测量粒子场的原理如图 1 所示。激光器出射的光束经扩束准直系统后变为平行光照射粒子场;其中部分平行光被粒子场散射形成物光 $O(x, y)$,其余平行光未被粒子场散射而形成参考光 $R(x, y)$,物光与参考光在记录平面发生干涉。由互补金属氧化物半导体(CMOS)记录干涉图样 $I(x, y)$:

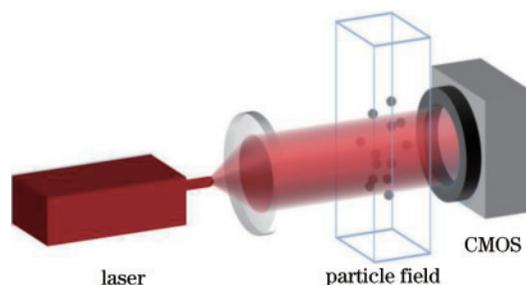


图 1 用于粒子场测量的同轴数字全息系统示意图
Fig.1 Schematic of in-line digital holographic system for particle field imaging

$$I(x, y) = |R(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2 + R(x, y)O^*(x, y) + R^*(x, y)O(x, y), \quad (1)$$

式中: (x, y) 为全息图记录平面; $I(x, y)$ 为 CMOS 记录的全息图强度; $R^*(x, y)$ 为参考光 $R(x, y)$ 的复共轭; $O^*(x, y)$ 为物光 $O(x, y)$ 的复共轭。

2.2 粒子全息的焦深

获得准确的轴向位置在粒子场测量中至关重要。

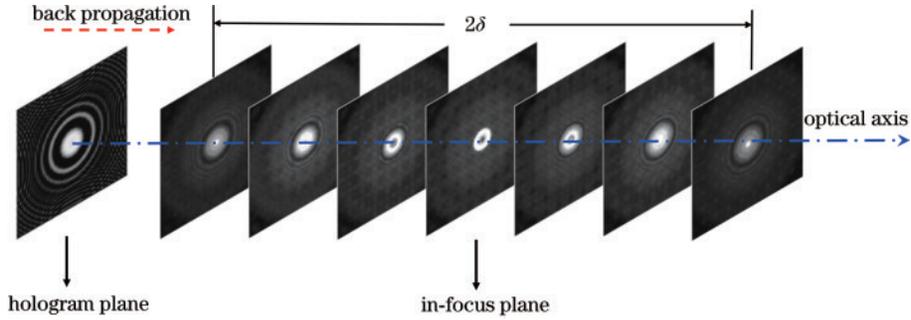


图 2 粒子像的焦深示意图

Fig. 2 Schematic of depth of focus in particle imaging

在瑞利极限条件下, 焦深与照明光波长 λ 和粒子衍射的孔径角 Ω 之间的关系^[17]为

$$\delta = \frac{\lambda}{2\Omega^2}. \quad (2)$$

仅考虑前向散射, 在傍轴和瑞利极限条件下, 粒子衍射的孔径角 Ω 与粒子直径 d 之间的关系为

$$\Omega = \frac{\lambda}{d}. \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 可得^[18]

$$\delta = \frac{d^2}{2\lambda}. \quad (4)$$

全息粒子场成像轴向定位精度受到全息成像焦深的限制, 焦深越大轴向定位精度越低。而前向散射形成的粒子图像具有极大的焦深, 对于直径为 10~

基于数字全息测量粒子场时, 粒子的轴向定位精度取决于全息成像和米氏散射的性质。如图 2 所示, 准直光照射粒子, CMOS 相机记录粒子全息图, 粒子全息图得到逆衍射重建时, 像空间沿轴向存在能量分布, 类比光学成像系统的焦深定义, 轴向一定距离 2δ 内, 离焦像保留了在焦图像 80% 的光能^[16], 称 δ 为粒子全息成像的焦深。在焦平面处光能量最集中, 在其两侧总长度为 2δ 的圆柱围成的区域即保留了 80% 的光能量。

20 μm 的颗粒, 其焦深可达到毫米级别。根据式(4), 基于数字全息对粒子场成像时, 粒子的焦深与照明光波长成反比关系, 故本文使用红外光照明粒子场, 以提高粒子的轴向定位精度。

3 分析与讨论

3.1 红外光照明的粒子全息仿真结果

分别模拟了使用波长为 520 nm 的绿光、638 nm 的红光及波长为 940 nm 的红外光源照明一粒径为 25 μm 的颗粒的实验, 该粒子与记录平面的距离为 5 mm。绿光、红光及红外光模拟生成的全息图分别如图 3(a)、(b)及(c)所示。可见, 由于红外光波长较长, 粒子在红外光照射下形成的全息图上的弥散斑更大, 即粒子衍射的孔径角 Ω 更大。

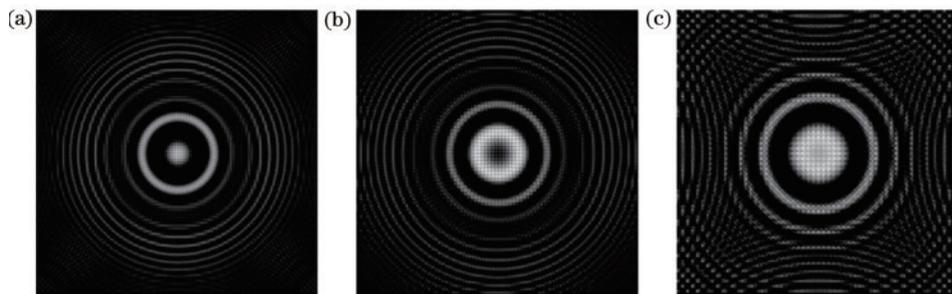


图 3 不同波长的光源照明得到的单粒子全息图。(a)绿光; (b)红光; (c)红外光

Fig. 3 Holograms of single particles illuminated by light sources with different wavelengths. (a) Green light; (b) red light; (c) infrared light

对图 3 所示的全息图在 4~6 mm 的范围内进行逆衍射重建, 轴向间隔设置为 10 μm , 获得了图 4(a)所示

的粒子的在焦像以及粒子在不同离焦距离时的重建图像。其中 0 μm 表示在焦像。可以发现当离焦距离相

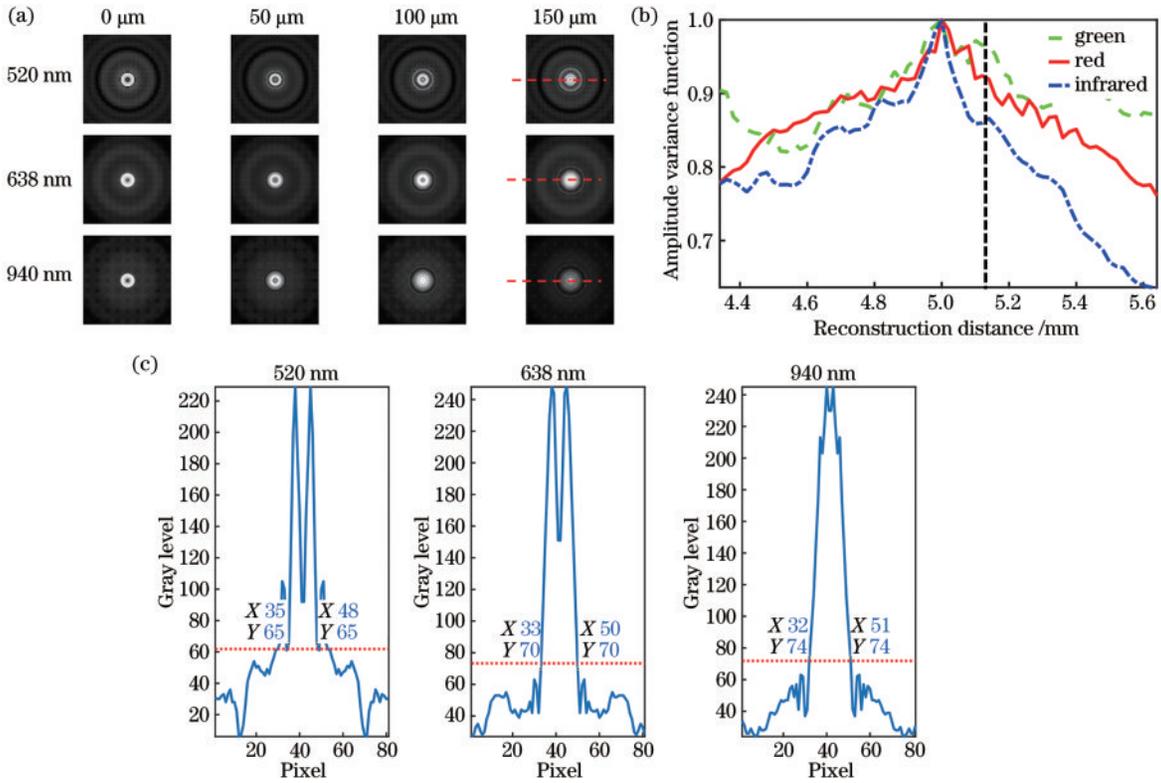


图 4 仿真得到的不同重建距离下的结果。(a)粒子重建图像;(b)归一化振幅方差函数;(c)截面强度

Fig. 4 Simulated results under different reconstruction distances. (a) Particle reconstruction images; (b) normalized amplitude variance functions; (c) sectional intensity diagrams

同时,红外光下光斑的弥散程度大于红光下光斑的弥散程度大于绿光下光斑的弥散程度,即与在焦的原图像相比,红外光的差异最明显。

为了定量说明上述的这种差异,选择了振幅方差函数作为聚焦判据^[19],结果如图 4(b)所示,表达式为

$$V_{\text{var}} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |I(m, n) - \bar{I}|^2, \quad (5)$$

式中:整体图像的灰度均值 $\bar{I} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I(m, n)$ 。

另外,为了量化说明图 4(a)的重建弥散程度,对重建距离为 150 μm 处的图像进行了中间截面强度分析。针对每张图像的对应位置,如图 4(a)虚线所示,选取了中心处的左右各 40 个像素,根据其灰度值的大小绘制得到了图 4(c)的图像,每个图中的水平虚线表示所有灰度的平均值。以该线(平均强度线)为基准,测量该横线与灰度值曲线的相交的位置,如图 4(c)所示,在波长为 520 nm 的图中,对应的像素位置分别为 35 和 48 像素,那么可以计算出其距离为 14 像素;同理,在 638 nm 的图中,对应的像素位置分别为 33 和 50 像素,距离为 18 像素;在 940 nm 的图中,对应的像素位置分别为 32 和 51 像素,距离为 20 像素。一般认为,位于该平均强度线以上的像素越少(即距离越小),说明光能量越集中,光斑的弥散程度越小。结果表明,红外光下平均强度线之间的距离大于红光下平均强度线之间的距离大于绿光下平均强度线之间的距离,即说

明红外光在同一重建距离下,弥散程度更大,更有利于粒子的轴向定位。

从图 4 可以看出,3 种波长在重建后的振幅方差函数都有良好的单峰性质,距在焦距离 5 mm 附近的同一离焦距离处,如图 4(b)垂直虚线所示,代表绿光的曲线的归一化函数值最大,代表红光的曲线次之,代表红外光的曲线最小。这说明红外光相比其他两种光源,在离焦之后可以更加迅速地将能量分散开,即可以更好地体现出在焦像和离焦像的区别,从而获得更高的轴向定位精度。

3.2 红外光照明的粒子场成像实验

搭建了基于同轴全息技术的粒子场全息成像系统,如图 5 所示。系统硬件主要包含红外光源、滤波器、准直镜、CMOS 及计算机系统。

本实验中红外光源使用了珠海迈致激光公司的型号为 HXB940500D 的红外激光器作照明光源,波长为 940 nm,功率为 500 mW,光束发散角可以通过激光器前面的调焦器件得到调整。空间光滤波器通过滤除杂散光以提高光斑的质量,它首先将从激光器出射的红外光束会聚到针孔位置处,光束经过针孔以球面波的形式出射,其中针孔的大小直接影响点光源的空间相干性和能量大小;球面波经过准直镜后变为平行光;在距离准直镜一定距离的位置放置 CMOS 图像传感器(海康威视工业相机 MV-CE050-31GC)记录干涉图样,其中 CMOS 的响应范围约为 370~1100 nm。由

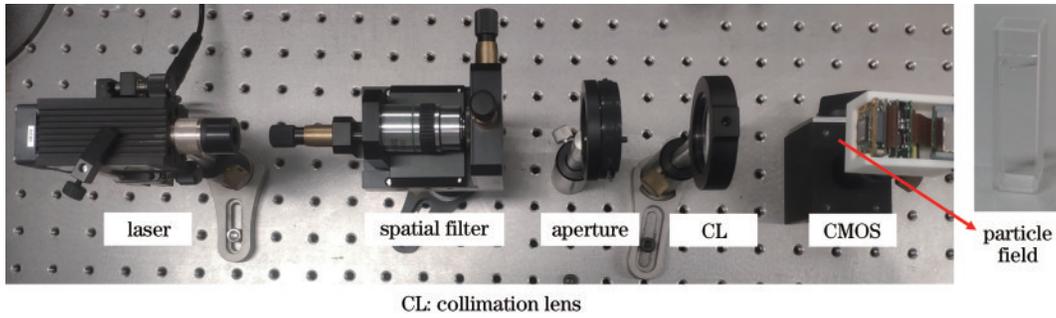


图 5 粒子场全息成像系统实物图

Fig. 5 Picture of the particle field holographic imaging system

于是准直后的平行光入射粒子场,系统放大率为 1,系统横向分辨率为 $2.2\ \mu\text{m}$ 。实验样本为置于石英比色皿中的直径为 $25\ \mu\text{m}$ 的聚苯乙烯微球,聚苯乙烯微球的密度为 $1.06\ \text{g/mL}$ 。样本粒子场放置于 CMOS 前方,如图 5 箭头所示位置。各具体硬件参数如表 1 所示。

为了对比展示红外全息图重建的焦深减小效果,分别将光源替换为型号为 RGBW 250 的绿光半导体激光器(波长为 $520\ \text{nm}$,功率为 $50\ \text{mW}$)、红光半导体激光器(波长为 $638\ \text{nm}$,功率为 $100\ \text{mW}$),对粒子场进行全息成像。粒子场相对稀疏,因此可以在对全息图进行逆衍射重建后选取一个粒子的位置,使用振幅方

表 1 红外光全息成像系统硬件参数

Table 1 Hardware parameters of the infrared holographic imaging system

| Hardware or parameter name | Parameter value |
|--------------------------------|---|
| Wavelength | $940\ \text{nm}$ |
| CMOS pixel size | $2.2\ \mu\text{m}$ |
| CMOS resolution | 2592×1944 |
| Collimation lens' focal length | $125\ \text{mm}$ |
| Quartz cuvette size | $12.5\ \text{mm} \times 5.5\ \text{mm} \times 4.5\ \text{mm}$ |

差函数作为聚焦判据分别获取 3 种波长光源照明下的粒子在焦平面的位置,再分别在在焦平面处一定距离重建出离焦像,结果如图 6 所示。

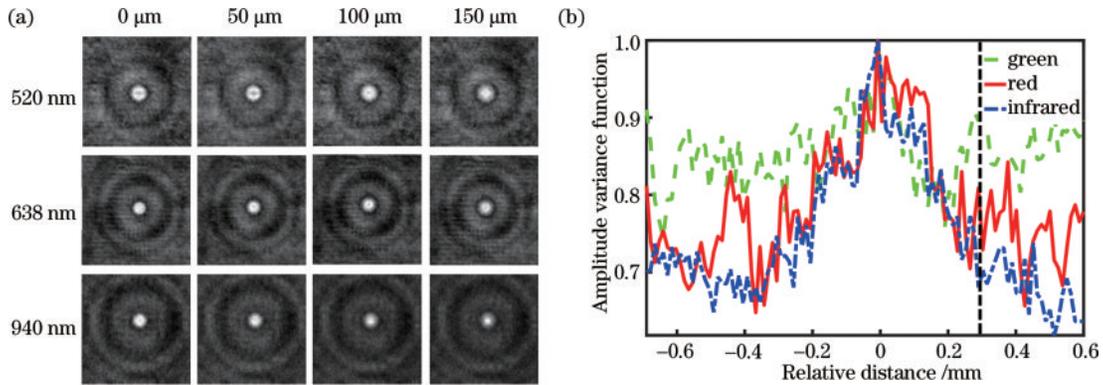


图 6 实验得到的不同重建距离下的结果。(a)粒子重建图像;(b)归一化振幅方差函数

Fig. 6 Results obtained from experiments at different reconstruction distances. (a) Particle reconstruction images; (b) normalized amplitude variance functions

同仿真中的结果类似,在离焦距离相同,例如同为 $0.10\ \text{mm}$ 时,红外光照明的粒子离焦像与在焦图像的差异最大,红光次之,绿光照明时差异最小。

值得指出的是,3 种颜色的光源照射粒子时,并不一定是针对同一个粒子的,只能保证都是针对一个直径为 $25\ \mu\text{m}$ 的粒子,而且其位置也不一定完全一致,因为更换不同波长的光源就需要重新拍摄。正因为图 6(a)中每一行对应的粒子不一样,所以 3 个粒子受到其他因素(如其他粒子的离焦像)的干扰程度也不一样,表现在每个粒子的在焦图像($0\ \mu\text{m}$)的弥散程度不同,因此不能只在同一重建距离(如 $150\ \mu\text{m}$)下纵向比

较 3 幅图像的弥散程度,应该结合对应波长的在焦图像来比较能量差异。

为了量化这种差距,仍然使用振幅方差函数作为自动聚焦判据,结果如图 6(b)所示。由于 3 条曲线分别对应不同的粒子,这里对 3 条曲线进行了平移,使得归一化振幅方差函数的最大值的位置相同。可以看到,与仿真相似,位于最大值附近的同一离焦距离处,如图 6(b)中垂直虚线所示,代表绿光的曲线的归一化函数值最大,代表红光的曲线次之,代表红外光的曲线最小。说明红外光相比其他两种光源,在离焦之后可以更加迅速地将能量分散开,即可以更好地体现出在

焦像和离焦像的区别。可见,增加照明光波长对使用聚焦判据进行轴向定位有较大的帮助。

对于红外光成像,在轴向范围为 1~4 mm 内,以轴向间隔为 10 μm 对全息图进行逆向传播重建,得到了 400 张重建图像。为了方便分析粒子的焦深,通过对重建图像进行裁剪获得了一个粒子的重建图像,如图 7(b)所示。对重建图像沿着 z 轴进行了堆叠渲染,效果如图 7(a)所示。仍然使用振幅方差函数作为聚

焦判据进行自动聚焦,效果如图 7(c)所示,图中竖线代表在焦位置。可以看到,进行三维堆叠重建时,粒子的重建像沿着 z 轴不断延伸,且越接近在焦平面光能量越强,随着与在焦平面的距离逐渐变大,光能量慢慢变弱。在自动聚焦时,振幅方差函数仍然表现出了良好的单峰性,并在 $z=2.58$ mm 处取得了最大值。最终求得该粒子的三维位置为 (140 μm , 123 μm , 2.58 mm)。

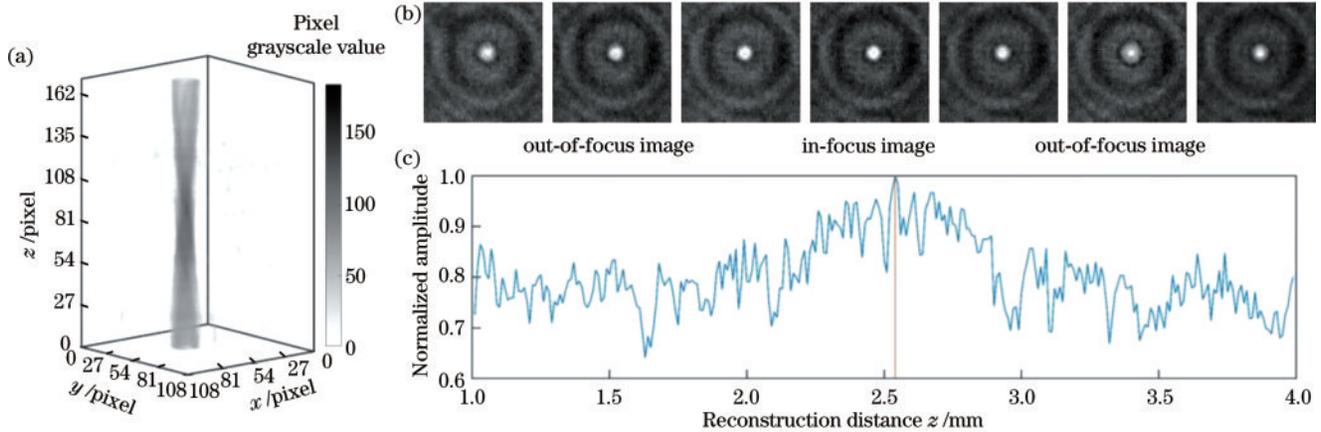


图 7 红外全息图重建与粒子定位。(a) 逆衍射重建像的三维堆叠;(b)沿 z 轴的重建图像;(c)振幅方差函数的轴向定位

Fig. 7 Infrared hologram reconstruction and particle localization. (a) Three-dimensional stacking of reconstructed images using inverse diffraction; (b) reconstructed images along the z -axis; (c) axial localization using amplitude variance function

3.3 波长与焦深分析

如 2.2 节所述,在一个衍射受限系统中,一个点物成像后在焦深 $\pm \delta$ 处弥散斑保留了光能量的 80%。为了量化不同光源在实验过程中对焦深的影响,通过手动加阈值的方法获得了粒子位于在焦平面的像,并对其灰度值进行求和;使用相同的方法得到了以 10 μm 为轴向间隔重建的粒子离焦图像的灰度值总和;当离焦像的灰度值总和为在焦像灰度值总和的 80% 时,该离焦平面与在焦平面的距离为该粒子的焦深。基于上述方法,量化了红光、绿光及红外光照明下 25 μm 直径聚苯乙烯微球的焦深,并展示在图 8 中。

由图 8 可以看出,使用绿光、红光及红外光源分别

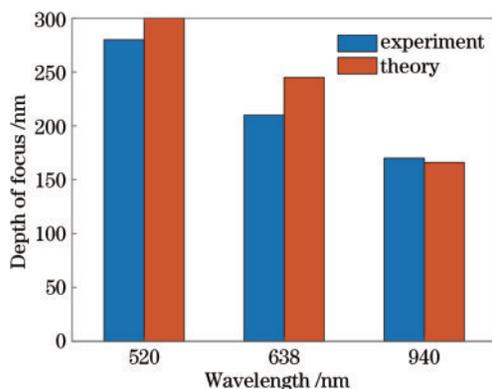


图 8 不同波长光源照明的焦深定量分析

Fig. 8 Quantitative analysis of focal depth under light source with different wavelengths

对统一的粒径为 25 μm 的聚苯乙烯微球进行成像,通过计算焦深可得,绿光对应的粒子焦深为 280 μm ,红光对应的粒子焦深为 210 μm ,红外光源照明时粒子焦深为 170 μm 。与之对应,单侧焦深理论值绿光对应 300 μm ,红光对应 245 μm ,红外光对应 166 μm ,计算值与理论值误差在 15% 之内。可见在对粒子进行重建时,增加照明波长能有效减小粒子成像时的焦深,红外光源下的焦深较红光减小了约 19%,较绿光减小了约 39%。在 2.2 节中发现粒子的焦深与轴向定位精度成反比关系,故减小焦深即提高了轴向定位精度。

4 结 论

理论分析了在粒子场全息重建中粒子的焦深与照明光波长成反比的关系。仿真和实验结果表明,增加光源波长,使用红外光照明粒子场的确可以减小粒子的焦深,减弱粒子离焦像的层间干扰,从而提高轴向定位精度。所提更换长波光源来提升轴向定位精度的方法可以与其他算法相结合,进一步提升粒子场重构的质量,为数字全息在粒子场监测领域的实用化奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Shao S Y, Mallery K, Kumar S S, et al. Machine learning holography for 3D particle field imaging[J]. Optics Express, 2020, 28(3): 2987-2999.
- [2] Zhang Y Y, Huang Z Z, Jin S Z, et al. Autofocusing of

- in-line holography based on compressive sensing[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 146: 106678.
- [3] Wu Y F, Wu J C, Jin S Z, et al. Dense-U-net: dense encoder-decoder network for holographic imaging of 3D particle fields[J]. *Optics Communications*, 2021, 493: 126970.
- [4] Ren Z B, Xu Z M, Lam E Y. Learning-based nonparametric autofocusing for digital holography[J]. *Optica*, 2018, 5(4): 337-344.
- [5] Ren Z B, Xu Z M, Lam E Y M. End-to-end deep learning framework for digital holographic reconstruction [J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1(1): 016004.
- [6] Murata S, Yasuda N. Potential of digital holography in particle measurement[J]. *Optics & Laser Technology*, 2000, 32(7/8): 567-574.
- [7] Buraga-Lefebvre C, Coëtmellec S, Lebrun D, et al. Application of wavelet transform to hologram analysis: three-dimensional location of particles[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, 33(6): 409-421.
- [8] Sun H, Dong H, Player M A, et al. In-line digital video holography for the study of erosion processes in sediments [J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13 (10): L7-L12.
- [9] Meng H, Anderson W L, Hussain F, et al. Intrinsic speckle noise in in-line particle holography[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1993, 10(9): 2046-2058.
- [10] Pu Y, Meng H. Intrinsic aberrations due to Mie scattering in particle holography[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2003, 20(10): 1920-1932.
- [11] Pan G, Meng H. Digital holography of particle fields: reconstruction by use of complex amplitude[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(5): 827-833.
- [12] Choo Y J, Kang B S. The characteristics of the particle position along an optical axis in particle holography[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(4): 761-770.
- [13] 钟杰, 李作友, 刘振清, 等. 测量粒子场的红外激光同轴全息技术[J]. *激光与红外*, 2009, 39(11): 1251-1254.
- Zhong J, Li Z Y, Liu Z Q, et al. Particle field measurement using infrared laser in-line holography[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(11): 1251-1254.
- [14] Su P, Sun D, Ma J S, et al. Axial resolution analysis in compressive digital holographic microscopy[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 1275-1288.
- [15] Luo Z P, Sun D, Su P, et al. Staggered tomography for spatially continuous objects in compressive holography[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(26): 265401.
- [16] Meng H, Hussain F. In-line recording and off-axis viewing technique for holographic particle velocimetry[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(11): 1827-1840.
- [17] Boutry G A. *Instrumental optics*[M]. Auerbach R, Transl. New York: Interscience, 1962: 354.
- [18] Meng H, Pan G, Pu Y, et al. Holographic particle image velocimetry: from film to digital recording[J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15(4): 673-685.
- [19] 谢晓昕. 数字全息快速自动聚焦技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019: 16-18.
- Xie X X. Research on digital holography fast auto-focusing technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019: 16-18.