

文章编号: 1001-3806(2010)01-0112-04

一种提高粒子再现像对比度的方法

李志斌^{1,3}, 郑刚^{1*}, 章立新^{1,2}

(1. 上海理工大学 光学与电子信息工程学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 动力工程学院, 上海 200093; 3. 上海电力学院 电力与自动化工程学院, 上海 200090)

摘要: 在对3维粒子场全息图的数值重构过程中, 为了提高和改善聚焦粒子再现像的对比度, 减小直透光、孪生像以及离焦粒子像的影响, 采用了1种数值处理方法, 通过对数值重构出的2个聚焦与非聚焦面上粒子复振幅相减, 可以将直透光、孪生像和离焦粒子像对聚焦粒子的影响同时减小, 并给出了简要理论以及仿真、实验结果。结果表明, 在同轴数字全息层析再现粒子场过程中, 该方法适用于在某一聚焦面仅显示聚焦粒子; 此外, 该过程仅需要一张全息图, 而且不需要对全息图做预前和后期处理。

关键词: 全息; 同轴数字全息; 焦深; 粒子分析; 离焦像

中图分类号: O438.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.032

A method for enhancing contrast of reconstructed particle image

LI Zhi-bin^{1,3}, ZHENG Gang¹, ZHANG Li-xin^{1,2}

(1. College of Optics and Electronics Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. College of Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. Faculty of Electric and Automatic Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In order to improve the contrast of a reconstructed image and reduce the effect of directly transmitted light, conjugate image and defocused image on the focused image of the particle in the reconstruction of a 3-D particle digital holography, a numerical method was proposed in which the above effect can be reduced because of the subtraction of both the complex amplitudes of the particle in the focused and defocused planes. The theory of the method was presented. The simulated results and experimental examples were shown. This method is useful to slice in-line digital holograms to display only in-focus particles at a focused plane. Furthermore, in the reconstruction process, only a single hologram is needed without additional pre- or post-processing.

Key words: holography; in-line digital holography; depth of focus; particle analysis; defocused image

引言

数字全息术一般采用电荷耦合成像器件 CCD 记录全息图, 替代了普通全息记录材料, 采用计算机数值模拟再现所记录的物场, 实现了全息图记录、存储、处理和再现全过程的数字化, 给全息术的发展和應用增加了新的方法, 有利于进行定量分析和测量, 也有利于实现过程的实时化。粒子场数字全息分析技术已成为3维粒子场测量的主要方法^[1-2]。由于 CCD 分辨率低于传统的感光记录介质, 从而限制了参考光与物光波的记录范围在 1°左右, 因此, 粒子场测量通常采用同轴光路装置, 粒子场的全息图直接记录在 CCD 芯片

上, 再通过数值模拟光学衍射过程, 得到粒子场的数字再现。利用层析分幅技术, 通过数字聚焦可以获得粒子场在不同焦平面上的分布, 实现对再现的 3-D 粒子场自动判读、分析、测量及处理。主要应用在喷雾、雾滴、聚合物粒子生长、微小粒子跟踪、微生物测量及分析等领域^[3-6]。

然而, 在数值重构出的粒子聚焦再现像面上除聚焦粒子再现像外, 由于直透光、孪生像以及离焦粒子像也同时以杂乱的散射光形式出现, 导致聚焦粒子再现像质下降, 不利于后期对粒子的自动分析处理。在离轴数字全息中可以通过频域滤波较好地将直透光和孪生像的频谱除掉^[7], 而在同轴数字全息中直透光、孪生像与聚焦粒子像的频谱不能分离, 因此直透光和孪生像的去除更困难。通过采用多步相移技术可以有效去除直透光和孪生像的影响^[8], 但是至少需要分时采集 4 幅全息图才可以彻底去除直透光和孪生像, 对环境稳定性和机械精度要求较高, 且只能用于静止不动

基金项目: 上海市教委发展基金资助项目(05LZ12)

作者简介: 李志斌(1974-), 男, 副教授, 博士研究生, 现主要从事数字全息、图像处理及软件编程方面的研究。

* 通讯联系人。gangzheng@usst.edu.cn

收稿日期: 2008-10-09; 收到修改稿日期: 2008-12-09

的物体的记录,对于要进行实时记录的粒子场测量就难于实现了。减平均法^[9]是用全息图减去整个全息图的平均值后得到的图便消除了直透光,这种方法只需采集一幅全息图,不需要任何相移装置,但孪生像依然存在,可以通过相位恢复算法^[10]进一步去除孪生像。

在3-D 粒子场测量中,离焦粒子像对聚焦粒子再现像的影响不能忽略,如果不能有效抑制或去除,将极大地限制数字全息在粒子分析测量领域的应用。当对记录粒子场的全息图在某一设定再现距离进行数值重构时,重构出的复振幅中包含着所有的粒子信息。此时,聚焦粒子的可视性受到众多离焦粒子衍射条纹的干扰而显著下降。同时,由于焦深通常是粒子直径的数十倍以上^[11],造成粒子轴向定位精度较低。因此,研究者们提出了许多粒子轴向定位方法,可以通过判定粒子中心的光强、复振幅或虚部变化率沿光轴分布曲线的极值而得到^[11-15]。虽然通过上述方法可以得到粒子的最佳聚焦平面,但离焦粒子的存在依然导致了聚焦粒子再现像质量下降。

作者的目的是提出一种简便方法,对一幅记录的粒子全息图,在不同距离上数值重构出两个聚焦与非聚焦面,然后通过重构出的粒子复振幅相减来改变聚焦粒子再现像的对比度,同时减小离焦粒子像对聚焦粒子的影响,以及去除直透光、孪生像的影响。此时,再现像面上只有聚焦粒子存在,非常便于后期的分析和处理。整个过程只需要一张记录粒子场信息的全息图,没有曲线拟和等复杂的处理过程。

1 粒子场全息图的生成与再现

粒子场测量中通常采用同轴全息记录光路,如图1所示。对物平面 η - ξ ,在粒子的投影截面内,光被遮

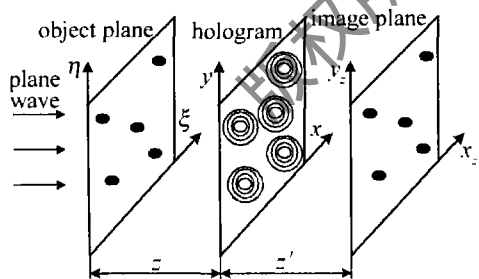


Fig. 1 Recording and reconstruction of in-line holography

挡,在投影截面外,光可以透过,被粒子衍射的光波以及未被扰动而直射的平面波,在记录平面 x - y 上产生干涉而被记录下来。当用波长为 λ 的单位振幅单色相干平面光波照射全息图时,则在距离全息面 $z' = z$ 处生成粒子场的再现像。

根据 Fresnel-Kirchhoff 原理,当 z 满足菲涅耳近似衍射条件时,距离物平面为 z 处衍射像场的光场分布

与原始物场之间的关系可以用菲涅耳衍射公式表示。其中的菲涅耳衍射积分可写成卷积形式^[1],即:

$$u_z(x, y) = u(x, y) \otimes P_z(x, y) \quad (1)$$

式中, $P_z(x, y) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left[\frac{jk}{2z}(x^2 + y^2)\right]$, u_z 为距离原始物场 z 处的衍射像场的光场分布, u 为粒子的振幅透射函数, λ 为光波波长, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, \otimes 代表卷积运算。

因此,全息记录平面的光强分布 I_z 可表示为:

$$I_z = u_z u_z^* \quad (2)$$

粒子再现像光场的复振幅分布同样可通过(1)式计算得到,只需用 I_z 替代 u 即可。全息图的数值重构就是以数字计算方法来实现光学再现的物理过程,其实质是利用 Fresnel-Kirchhoff 衍射积分公式,数字模拟光学衍射过程。 z 处的全息图通过 CCD 被抽样,并按照像素离散化为 2-D 阵列 $I_z(m, n)$,再以数字形式存储于计算机, m, n 分别表示沿 x, y 方向的离散坐标,则 $x = m \cdot \Delta x, y = n \cdot \Delta y$, $\Delta x, \Delta y$ 为 x, y 方向的采样间隔,即 CCD 的像素尺寸, $M \times N$ 为 CCD 的像素数。当对菲涅耳衍射积分计算采用卷积计算方法时,坐标系并未改变,所以再现像的分辨率与全息图的分辨率是相同的,跟再现距离无关。

2 聚焦粒子像对比度提高的方法

2.1 焦深

在数字全息系统中,焦深可以定义为在保持再现像较为清晰的前提下,再现像平面沿着光轴所允许移动的距离。虽然理论上只有唯一的最佳粒子清晰再现像,但是只要处于焦深范围内,离焦的粒子再现像都可认为是同样的清晰像。因此,粒子的焦深本质上是粒子清晰再现像的误差容许范围。

根据参考文献[16]和参考文献[17],粒子的焦深可表示为:

$$2\Delta z' = \frac{\lambda}{(d_{NA})^2} \quad (3)$$

式中, λ 为激光波长, d_{NA} 为记录系统的数值孔径。按照与传统光学成像系统数值孔径相类似的定义,如果数字全息记录系统中没有使用成像透镜,那么系统在 x 和 y 方向的数值孔径 $d_{NA,x}$ 和 $d_{NA,y}$ 分别为:

$$d_{NA,x} = \sin\left[\tan^{-1}\left(\frac{L_x}{2z}\right)\right], d_{NA,y} = \sin\left[\tan^{-1}\left(\frac{L_y}{2z}\right)\right] \quad (4)$$

一般情况下, $L_x \ll z, L_y \ll z$, 因此(4)式可以简化为:

$$d_{NA,x} = \frac{L_x}{2z}, d_{NA,y} = \frac{L_y}{2z} \quad (5)$$

而通常情况下 $L_x > L_y$, 故 $d_{NA,x} > d_{NA,y}$, 于是粒子最大焦深 $2\Delta z'_{\max}$ 的数学描述为:

$$2\Delta z_{\max}' = \frac{4\lambda z^2}{L_1^2} \quad (6)$$

目前较小的 CCD 或 CMOS 芯片尺寸导致粒子场的数值重构过程中具有较大的焦深,影响粒子的轴向定位精度。为了不造成再现过程中粒子“丢失”现象,因此,在数值重构 3 维粒子场之前必须明确粒子焦深的大小,令轴向采样间距小于粒子的焦深,以确保能够重构出所有的粒子聚焦再现像,有利于提取出粒子的相关信息。

2.2 离焦粒子像的去除

粒子的层析再现过程如图 2 所示。在粒子的聚焦

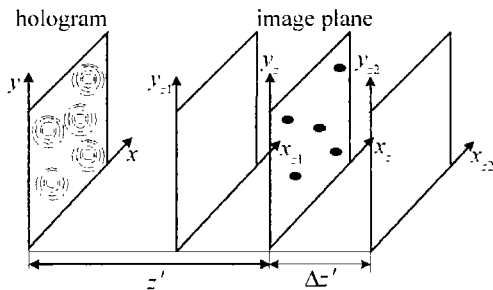


Fig. 2 Reconstruction geometry for particles slicing

平面,假设 u_1^* 和 u_1 分别代表聚焦粒子实像和共轭像的复振幅, u_2^* 和 u_2 分别代表其它离焦粒子实像和共轭像的复振幅, u_d 代表直透光。既然在粒子的聚焦平面上 u_1^* 为聚焦粒子实像,因此可以用实数 $\text{Re}(u_1^*)$ 表示。于是在聚焦平面(再现距离为 z')和离焦平面(再现距离为 $z' + \Delta z'$)处的粒子再现光场的复振幅可分别表示为:

$$u(x_2, y_2, z') = \text{Re}(u_1^*) + u_1 + u_2^* + u_2 + u_d \quad (7)$$

$$u(x_2, y_2, z' + \Delta z') = u_1^* + u_1 + u_2^* + u_2 + u_d \quad (8)$$

当 $\Delta z'$ 非常小时,粒子的共轭像、离焦像和直透光的复振幅变化较小,并不显著,而粒子实像的复振幅在这 2 个再现平面上变化非常剧烈。假设粒子不透光, u 为粒子的振幅透射函数,那么 $u(x_2, y_2, z')$ 和 $u(x_2, y_2, z' + \Delta z')$ 相减后的复振幅主要为 u_1^* 的实部,于是粒子再现图像中就只留下聚焦粒子,即:

$$u(x_2, y_2, z') - u(x_2, y_2, z' + \Delta z') \approx u^* \quad (9)$$

相减的结果既去除了离焦粒子,同时也去除了直透光和共轭像。

3 仿真及实验研究

为了进一步探讨上述方法对去除离焦粒子像提高聚焦粒子像对比度的效果,作者利用 MATLAB7.0 软件工具首先对 30 个直径为 $75\mu\text{m}$ 的球形粒子进行计算机仿真。选取全息图像分辨率为 1024 像素 \times 1024 像素,像素尺寸为 $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$,仿真光波的波长为 632.8nm 。在 1024 像素 \times 1024 像素 \times 1000 像素的空间中(对应的空间尺寸是 $5.12\text{mm} \times 5.12\text{mm} \times 5\text{mm}$)

生成直径为 $75\mu\text{m}$ 的 30 个小球体,等间距分布在 3 个层面上,每层 10 个粒子。利用(1)式和(2)式通过数值计算可以得到相应的粒子全息图,记录距离(第 1 层 10 个粒子距离 CCD 的距离)为 100mm 。

图 3a、图 3b 和图 3c 中的第 1 张图给出了直接利

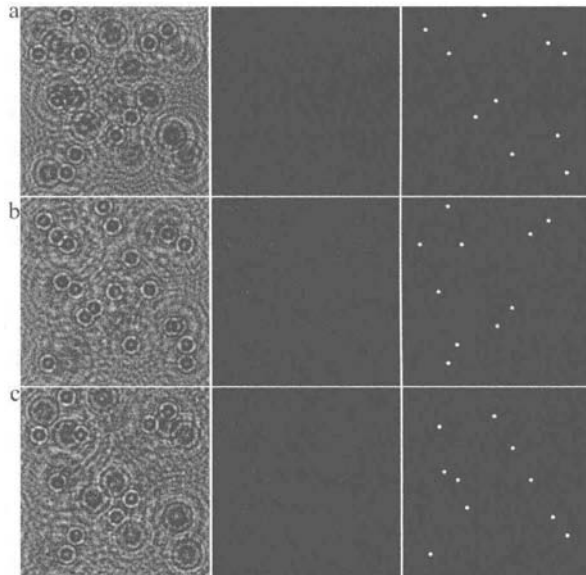


Fig. 3 Focused particle images in three different planes with direct reconstruction

a— $z' = 100\text{mm}$; b— $z' = 102.5\text{mm}$; c— $z' = 105\text{mm}$

用卷积方法在再现距离 z' 分别为 100mm , 102.5mm 和 105mm 时重构出的相应聚焦粒子的数值再现像,从这 3 张再现图像中可以看到,亮背景主要是受到直透光的影响,而对粒径较小的粒子,孪生像的影响也较为有限,对聚焦粒子可视性影响最大的还是离焦粒子的衍射像。因此,很难通过常规的图像处理手段直接提取出聚焦粒子,不便于分析和获取聚焦粒子的粒径等信息。图 3a、图 3b 和图 3c 中的第 2 张图给出了应用复振幅相减的方法而得到的 3 个聚焦粒子再现像平面,相减的两个再现像面中一个为粒子聚焦面,另一个再现像面距离聚焦面选择 $1/2$ 焦深,即 $\Delta z' = \Delta z_{\max}'$ 。由于焦深与记录距离有关,因此,根据(6)式得到 3 个再现平面选择的间距分别为 0.48mm , 0.50mm 和 0.53mm 。从图中可以看到,相减后聚焦粒子为中空的圆环,这是因为两个相减平面上复振幅的变化主要集中在聚焦粒子的边缘。而其它离焦粒子像在聚焦粒子像平面上基本上被有效去除了,聚焦粒子像的对比度明显得到提高,同时相减的结果还有效抑制了直透光对聚焦粒子再现像的影响。图 3a、图 3b 和图 3c 中的第 3 张图则给出了填充以后的聚焦粒子再现像,可以看出共轭像、离焦像和直透光均有效去除。

为了进一步探讨较高浓度下,该方法对去除离焦粒子像提高聚焦粒子像对比度的效果,在 1024 像素 \times 1024 像素 \times 160 像素的空间中(对应的空间尺寸是

5.12mm×5.12mm×0.8mm)生成直径为50 μm 的250个小球体,等间距分布在3个层面上,每层50个粒子。利用(1)式和(2)式通过数值计算可以得到相应的粒子全息图,记录距离(第1层50个粒子距离CCD的距离)为100mm。

图4a中给出了直接利用卷积方法,在再现距离 z' 为100mm时,重构出的相应聚焦粒子的数值再现像,

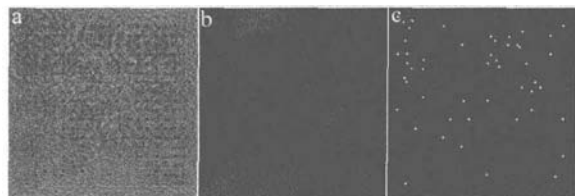


Fig. 4 Focused particle images in three different planes after subtraction
a—direct reconstruction b—after subtraction c—after fill

从这张再现图像中可以看到离焦粒子的衍射像严重干扰了聚焦粒子再现像,无法分清和获取聚焦粒子的相关信息。图4b中给出了应用复振幅相减的方法而得到的聚焦粒子再现像平面,聚焦粒子是中空的圆环,此时离焦粒子的衍射像虽然仍存在于图中,但强度明显降低,仅作为背景噪声存在,对聚焦粒子的干扰有限。图4c中给出了应用阈值法并经填充后的聚焦粒子再现像,基本去除了离焦粒子衍射像的干扰。由此可见,利用聚焦平面与离焦平面复振幅相减的方法,可以有效地改善聚焦粒子再现像的对比度,抑制或去除离焦像、共轭像和直透光的影响。

本文中对直径为50 μm ~100 μm 的粒子进行了实验研究,记录粒子全息图的CCD分辨率为2032像素×1520像素,尺寸6.4mm×4.8mm,选用He-Ne激光器,记录波长为632.8nm,记录距离为100mm。对实验中记录的粒子全息图利用卷积算法直接进行数值重构的结果如图5a所示,图中的亮背景主要是直透光成分,因为

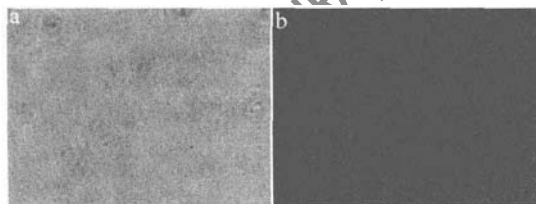


Fig. 5 Focused particles image at $z' = 100\text{mm}$
a—direct reconstruction b—after subtraction

粒子较小所以孪生像不是主要影响因素,而许多离焦粒子像同时出现在图中,聚焦粒子图像的对比度较低。图5b所示的是再现光场复振幅相减后的聚焦粒子再现像,相减两平面的间距为309 μm 。可以看出,通过上述方法可以明显减小离焦粒子像的影响,同时还可以去除直透光的影响,聚焦粒子再现像的对比度得到了改善。

4 结论

从上面的计算机仿真及实验结果可以看出,应用复振幅相减法提高聚焦粒子再现像对比度效果明显,方法简单便于实现,而且只需要一张记录粒子场的全息图。本文中提出的方法可以有效去除直透光和离焦粒子对聚焦粒子的影响,该方法对小粒子的聚焦再现效果较好,相减的两个再现像面间距要小于焦深。

参考文献

- [1] ADAMS M, KREIS T, JÜPTNER W. Particle analysis with digital holography [J]. Proc SPIE, 2000, 4101: 314-319.
- [2] MURATA S, YASUDA N. Potential of digital holography in particle measurement [J]. Optics & Laser Technology, 2000, 32(8): 567-574.
- [3] PALACIOS F, RICARDO J, PALACIOS D, et al. 3-D image reconstruction of transparent microscopic objects using digital holography [J]. Opt Commun, 2005, 248(1/3): 41-50.
- [4] MALKIEL E, SHENG J, KATZ J, et al. The three-dimensional flow field generated by a feeding calanoid copepod measured using digital holography [J]. Journal of Experimental Biology, 2003, 206(20): 3657-3666.
- [5] FUGAL J P, SHAW R A, SAW E W, et al. Airborne digital holographic system for cloud particle measurements [J]. Appl Opt, 2004, 43(32): 5987-5995.
- [6] LI Z R, YE Y, ZHENG X X, et al. Micro-jet particle field measurement using in-line Fraunhofer holography [J]. Laser Technology, 2004, 28(1): 45-47 (in Chinese).
- [7] ZHANG Y M, LÜ Q N, GE B Zh. Elimination of zero-order diffraction in digital off-axis holography [J]. Opt Commun, 2004, 240(4/6): 261-267.
- [8] LAI S, KING B, NEIFIELD M A. Wave front reconstruction by means of phase-shifting digital in-line holography [J]. Opt Commun, 2000, 173(1/6): 155-160.
- [9] KREIS T, JÜPTNER W. Suppression of DC term in digital holography [J]. Opt Engng, 1997, 36(8): 2357-2360.
- [10] DENIS L, FOURNIER C, FOURNEL T, et al. Twin-image noise reduction by phase retrieval in in-line digital holography [J]. Proc SPIE, 2005, 5914: 1-14.
- [11] MENG H, PAN G, PU Y, et al. Holographic particle image velocimetry: from film to digital recording [J]. Measurement Science Technology, 2004, 15: 673-685.
- [12] SHEN G X, WEI R J. Digital holography particle image velocimetry for the measurement of 3Dt-3c flows [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2005, 43(10): 1039-1055.
- [13] FOURNIER C, DUCOTTET C, FOURNEL T. Digital holographic particle image velocimetry: 3-D velocity field extraction using correlation [J]. Journal of Flow Visualization & Image Processing, 2004, 11(1): 53-72.
- [14] MALEKM, ALLANOD, COËTMEILLECS. Digital in-line holography: influence of the shadow density on particle field extraction [J]. Optics Express, 2004, 12(10): 2270-2279.
- [15] PAN G, MENG H. Digital holography of particle fields: reconstruction by use of complex amplitude [J]. Appl Opt, 2003, 42(5): 827-833.
- [16] GARCIA-SUCERQUIA J, CASTAÑEDA R. Spatial partially coherent imaging [J]. Journal of Modern Optics, 2002, 49(13): 2093-2104.
- [17] MEDINA F F, CASTANEDA R, GARCIA J. Resolution, focus depth in the Fresnel-Fraunhofer domains [J]. Proc SPIE, 2006, 6027: 1-9.