

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0270-06

一种减小焦深对粒子定位测量影响的方法

李志斌^{1, 2} 郑刚² 章立新³ 夏飞¹

(¹上海电力学院 电力与自动化工程学院, 上海 200090; ²上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)
³上海理工大学动力工程学院, 上海 200093)

摘要 采用同轴数字全息技术测量研究粒子场, 由于直透光、孪生像等因素的影响, 以及焦深(DOF)通常是粒子直径的数十倍以上, 造成了粒子轴向定位精度普遍较低。通过分析影响焦深大小的因素, 采用增大系统的数值孔径, 即减小记录距离可以明显降低焦深, 并提出一种用于粒子轴向定位的基于最大梯度的自动聚焦算法。自动聚焦算法中通过选择适当大小的对焦窗口将再现粒子包含在内, 对粒子边缘识别区域的任意可能的梯度方向都求出它的梯度, 利用比较后得到最大的梯度, 作为自动聚焦判别数据。同时, 考虑到算法的精确度和稳定性, 引入了阈值参数。经仿真和实验表明, 该算法具有较好的单峰性和稳定性, 可减小焦深对粒子轴向定位精度的影响。

关键词 全息; 自动聚焦; 焦深; 数值重构

中图分类号 TB877.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0270

A Method for Decreasing the Impact of Depth-of-Focus to Accurate Location of Particle

Li Zhibin^{1,2} Zheng Gang² Zhang Lixin³ Xia Fei¹

¹Faculty of Electric and Automatic Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China
²School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China
³College of Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract The particle fields is generally measured by digital in-line holographic technique. But the resolution of particle axial position is lower due to the impact of zero-order image, twin-image noise and the depth of focus(DOF). Generally, DOF is tens of times as many as particle diameter. The large DOF has been a vexing problem in extraction of particle position from digital in-line holograms. DOF is affected by some recording parameters, i. e. NA of recording system, size of CCD, recording distance and the wavelength. Resolution of particle axial position can be improved by reducing depth of focus and recording distance. In this paper, an auto-focusing algorithm based on the most gradient for accurate location of particle by selecting proper window in accordance with particle size is proposed. At present, there are a lot of auto-focusing algorithms based on gradient, which calculate the gradient value only in appointed fixed directions, but the real gradient direction may not be the appointed direction. In order to solve the problem, an auto-focusing algorithm based on the most gradient and threshold is proposed. The gradients in all possible directions are calculated, then compare all of the possible gradients, and choose the largest gradient as the result. At the same time, in order to improve the precision and stability of auto-focusing algorithm, another threshold parameter is introduced. Through simulations and experiments, the algorithm has the characteristics such as strong single peak feature and good stability, which could decrease the impact of DOF to resolution of particle axial position.

Key words holography; auto-focusing; depth of focus; numerical reconstruction

1 引言

粒子场数字全息分析技术已成为三维粒子场测量的主要方法^[1,2]。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

基金项目: 上海市教委发展基金(05LZ12)和上海市教委重点学科建设项目(JS1301)资助课题。

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

E-mail: thermal_li@163.com

导师简介: 郑刚(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事颗粒测量方面的研究。E-mail: gangzheng@usst.edu.cn

子场在不同焦平面上的分布,实现对再现的三维(3D)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]。而数字全息粒子图像测速技术(DHPIV)是目前能在较高雷诺数、有限体积内进行连续三维速度场分布测量的重要技术手段^[1,7,8]。粒子场中粒子的轴向深度位置能否精确定位,是分析速度场的至关重要的因素。

由于直透光、孪生像等因素的影响,以及焦深通常是粒子直径的数十倍以上^[9],造成粒子轴向定位精度较低。粒子轴向定位的许多方法被提出,主要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^[7~12],由于焦深的影响导致这些判定粒子聚焦的算法普遍存在单峰性较差,稳定性不好的缺点,造成粒子轴向定位精度较低。因此,如何减小焦深对粒子轴向精确定位影响的研究就显得非常有意义。为此,本文分析了影响焦深大小的因素,并提出一种用于粒子轴向定位的基于最大梯度的自动聚焦算法。同时,考虑到算法的精确度和稳定性,引入了阈值参数。经仿真和实验表明,该算法具有较好的单峰性和稳定性。

2 焦 深

2.1 焦深的数学描述

在数字全息系统中,焦深(DOF)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被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。

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 $\eta-\zeta$,在粒子的投影截面内光被遮挡,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 CCD 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 $z'=z$ 处的像平面 $x'-y'$ 生成粒子场的再现像。图中 z 是物平面至 CCD 记录面的距离, L_x 和 L_y 分别是 CCD 阵列面的长和宽, L_ζ 和 L_η 分别是被记录粒子场的长和宽, $\Delta z'$ 表示允许的粒子再现像平面偏离最佳聚焦再现像平面的范围。

根据文献^[13,14],粒子的焦深可表示为

$$2\Delta z' = \lambda / (NA)^2, \quad (1)$$

其中 λ 为激光波长, NA 为记录系统的数值孔径。按

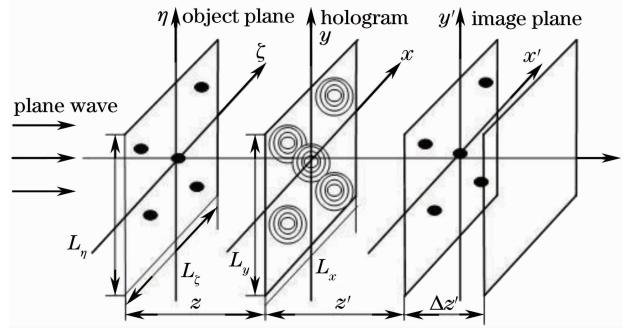


图1 粒子同轴全息的记录与再现

Fig.1 Recording and reconstruction of in-line holography for particles

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 NA_x 和 NA_y 分别为

$$NA_x = \sin\{\arctan[L_x / (2z)]\}, \quad (2)$$

$$NA_y = \sin\{\arctan[L_y / (2z)]\},$$

一般情况下, $L_x \ll z, L_y \ll z$,因此(2)式可以简化为

$$NA_x = \frac{L_x}{2z}, \quad NA_y = \frac{L_y}{2z} \quad (3)$$

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

$$2\Delta z'_{max} = 4\lambda z^2 / L_x^2. \quad (4)$$

2.2 对粒子轴向定位精度的影响

由(4)式可知,粒子再现像的聚焦深度是由 CCD 靶面尺寸、记录距离及记录波长这 3 个参数决定的。CCD 靶面尺寸越大,记录距离越近,记录波长越短,则焦深越小。因此,当记录系统参数固定以后,可以选择满足系统要求的最小记录距离来降低焦深。假设 CCD 靶面的尺寸为 $L_x=L_y=10.24$ mm,像素宽度为 $\Delta x=\Delta y=5$ μm ,记录波长 $\lambda=632.8$ nm。对一个直径为 50 μm 的球形粒子,当记录距离分别为 100 mm, 200 mm, 300 mm和 400 mm时,粒子的焦深分别为 241 μm , 964 μm , 2169 μm 和 3856 μm ,分别是粒子直径的 4.82 倍, 19.28 倍, 43.38 倍和 77.12 倍。可以看到,粒子的焦深随记录距离的增大而明显增加,对粒径只有几十微米的粒子来说,粒子焦深达到其粒径的几倍,甚至百倍以上。

因此,焦深影响粒子的轴向定位体现在两方面。一方面,因为在焦深范围内,数值重构的粒子再现像都是较清晰的,很难区别出哪一个粒子再现像最清晰,故粒子在轴向深度定位具有的不确定性会给轴向速度分量的测量带来较大的误差。另一方面,明确粒子焦深的大小对数值重构粒子再现像具有指导意义。对采用同轴数字全息拍摄的粒子场全息图的

再现通常利用层析技术重构三维粒子场空间,而采样间距的大小不仅影响数值重构三维粒子场的运行时间,而且影响粒子轴向深度的定位精度。如果采样间距太小,则会消耗大量的时间,测量精度也不会提高多少;如果采样间距过大,虽然减少了运行时间,但是有可能再现不出某些粒子的聚焦像,会造成粒子“丢失”。因此,在数值重构三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。

故降低焦深有利于提高轴向深度的定位精度,而通过增大记录系统的数值孔径的效果最明显,即减小记录距离是最佳、最实用的技术手段,但前提条件是记录距离要大于系统要求的最小记录距离。

3 粒子轴向定位的自聚焦评价函数建立

3.1 最大光强法

最大光强法是目前应用较多的用来判定粒子场中粒子聚焦平面的一种自动聚焦评价方法,其基本工作原理为:第一步,对记录粒子场的全息图像进行数值重构,给出沿轴向(z 轴)不同深度的粒子场再现像;第二步,选择粒子中心光强作为聚焦评价的特征量;最后,根据粒子中心光强(图像灰度)沿轴向的变化曲线,找到峰值所对应的轴向深度位置作为该粒子的最佳聚焦再现像位置。

但通过大量仿真、实验以及相关文献^[3,8]查阅发现,最大光强法作为聚焦评价函数并不具有稳定的单峰性,与粒子直径大小相关,定位精度较低。图2所示的是对粒径分别为 $5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 、 $25\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m}$ 5种大小的球形粒子进行数值仿真得到的粒子中心光强沿轴向变化的归一化曲线。仿真实验参数:全息图像分辨率为 $512\ \text{pixel} \times 512\ \text{pixel}$,像素尺寸为 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$,仿真光波的波长为 $632.8\ \text{nm}$,记录距离为 $50\ \text{mm}$ 。

从图2可以看出,在粒径为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 时,最大光强法聚焦评价函数具有单峰性,定位准确。当粒径大于 $10\ \mu\text{m}$ 时,最大光强法聚焦评价函数呈现明显的双峰性,可通过双峰的中间位置来定位粒子最佳聚焦面所在轴向位置,但准确度会有所下降,有 $\pm 1 \sim \pm 5\ \text{pixel}$ 的偏差。而且当粒径变大后,双峰的位置距离增大,在轴向采样间距不变的情况下,为了定位粒子最佳聚焦面,就必须重构更多的再现像,增加了计算量。但数据量增大的同时,定位精度

并没有提高,反而有所下降。因此,最大光强法聚焦评价函数适用于粒径较小的粒子。

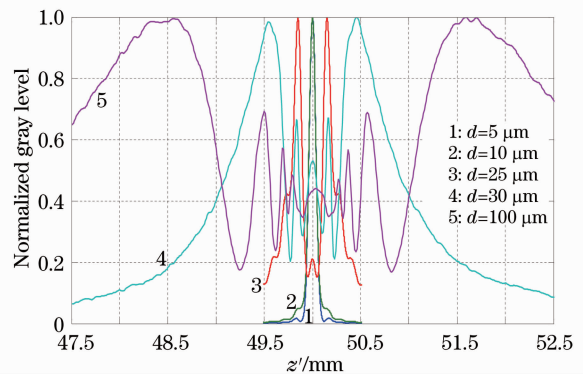


图2 粒子中心光强沿轴向的归一化曲线

Fig. 2 Intensity distribution of particle center along the axial direction

3.2 最大梯度法

由于完全聚焦的粒子再现像中粒子边缘灰度变化较大,即梯度较大,因此粒子再现像的聚焦程度可以用粒子边缘梯度来进行描述,可借鉴一般成像系统中基于梯度的自动聚焦算法。但这些算法在计算梯度的时候,仅仅计算了一个或者二个方向上的梯度,但是粒子边缘不同位置处的梯度方向可能与算法指定的梯度方向不一样。因此,这样就存在一定的误差。另外,粒子再现像受到直透光和孪生像等噪声的污染,基于梯度的自动聚焦算法对噪声非常敏感。这些算法在没有噪声时,算法的灵敏度和单峰性可能还不错,但是一旦受到噪声的影响,算法就会失效。

为了解决以上问题,本文提出了一种基于最大梯度的自动聚焦算法。首先,在对焦窗口中求出任意可能梯度方向的梯度,然后比较哪个方向的梯度最大,保留最大的梯度作为最后的结果,其他的则丢弃。同时,考虑到聚焦算法的精确度和算法的稳定性,再引入阈值参数,利用这个阈值可以很好地滤除粒子再现像中的背景信息和噪声带来的干扰。

对于任意的一个粒子再现像,它的梯度方向只能是在水平方向、垂直方向、正 45° 方向、负 45° 方向中的一种。为了减小误差,使得到的梯度是真实的梯度,现对梯度计算作如下的设计。对于粒子再现像中的任意一个像素 $f(x, y)$,将其周围的 $8\ \text{pixel}$ 考虑进来,根据梯度在各个方向的情况,各个方向上的具体算法的定义如下所示:

1) 边缘线在水平方向上

$$\begin{cases} X_1 = f(x-1, y-1) + f(x-1, y) + \\ \quad f(x-1, y+1), \\ X_2 = f(x, y-1) + f(x, y) + \\ \quad f(x, y+1), \\ X_3 = f(x+1, y-1) + f(x+1, y) + \\ \quad f(x+1, y+1), \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} G_1 = |X_2 - X_1|, \\ G_2 = |X_3 - X_2|, \\ f_{\max1} = \max(G_1, G_2), \end{cases} \quad (6)$$

2) 边缘线在垂直方向上

$$\begin{cases} Y_1 = f(x-1, y+1) + f(x, y+1) + \\ \quad f(x+1, y+1), \\ Y_2 = f(x-1, y) + f(x, y) + \\ \quad f(x+1, y), \\ Y_3 = f(x-1, y-1) + f(x, y-1) + \\ \quad f(x+1, y-1), \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} G_3 = |Y_2 - Y_1|, \\ G_4 = |Y_3 - Y_2|, \\ f_{\max2} = \max(G_3, G_4), \end{cases} \quad (8)$$

3) 边缘线在正 45°角上

$$\begin{cases} P_1 = f(x-1, y-1) + f(x-1, y) + \\ \quad f(x, y-1), \\ P_2 = f(x-1, y+1) + f(x, y) + \\ \quad f(x+1, y-1), \\ P_3 = f(x, y+1) + f(x+1, y) + \\ \quad f(x+1, y+1), \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} G_5 = |P_2 - P_1|, \\ G_6 = |P_3 - P_2|, \\ f_{\max3} = \max(G_5, G_6), \end{cases} \quad (10)$$

4) 边缘线在负 45°角上

$$\begin{cases} N_1 = f(x-1, y) + f(x-1, y+1) + \\ \quad f(x, y+1), \\ N_2 = f(x-1, y-1) + f(x, y) + \\ \quad f(x+1, y+1), \\ N_3 = f(x, y-1) + f(x+1, y-1) + \\ \quad f(x+1, y), \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} G_7 = |N_2 - N_1|, \\ G_8 = |N_3 - N_2|, \\ f_{\max4} = \max(G_7, G_8), \end{cases} \quad (12)$$

其中 $f_{\max1}$, $f_{\max2}$, $f_{\max3}$ 和 $f_{\max4}$ 分别是水平方向、垂直方向、正 45°方向和负 45°方向上较大一个梯度值。因为梯度方向只能是它们中的一种,而且真实的梯度方向上的梯度值也较大,因此,求出它们中的

最大值作为真实的梯度值。

$$f_{\max} = \max(f_{\max1}, f_{\max2}, f_{\max3}, f_{\max4}), \quad (13)$$

(13)式中 \max 是求出四个数中最大值的函数。这是对 3×3 窗口的计算,把对焦窗口中粒子再现像分成若干个 3×3 窗口,按以上方法依次计算即可。

但是由于只选了 3×3 窗口,窗口较小,对噪声敏感,所以求得的梯度可能包含较多的噪声干扰。另外,背景信息的梯度也会对聚焦算法有较大的影响。为了将这些噪声点去除和减少背景的影响,重新选取一个表征对焦窗口图像整体噪声分布水平的阈值 T ,可定义为

$$T = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) - F_{\text{mean}}]^2}, \quad (14)$$

式中 M, N 分别为对焦窗口的行数和列数, F_{mean} 为均值。

求出 T 之后,再求出各个 3×3 窗口 $W(x, y)$ 的方差 $\sigma^2(x, y)$,只有当 $\sigma^2(x, y)$ 大于 T 时,对应的该窗口的梯度保持,否则认为这个 3×3 窗口的梯度是由于背景信息或者噪声干扰引起的,可表示为

$$G_{\text{gradient}} = \begin{cases} f_{\max}^2, & \text{if } \sigma^2 \geq T \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

对最大梯度平方的目的是进一步提高目标图像梯度在整个梯度值的作用,因为边缘梯度的值相对于非边缘像素的梯度值要大,平方之后边缘像素的作用得到进一步提高,从而聚焦算法具有更好的精确度。最后把各个窗口的梯度值 G_{gradient} 进行求和即可得到最后的梯度值,并作为粒子聚焦判别数据。

图 3 给出了应用最大梯度自聚焦算法对直径为 500 μm 的单个粒子进行轴向定位的结果,为最大梯度自聚焦评价函数在轴向深度的采样间隔分别为 100 μm, 500 μm 和 1000 μm 下的曲线。实验记录

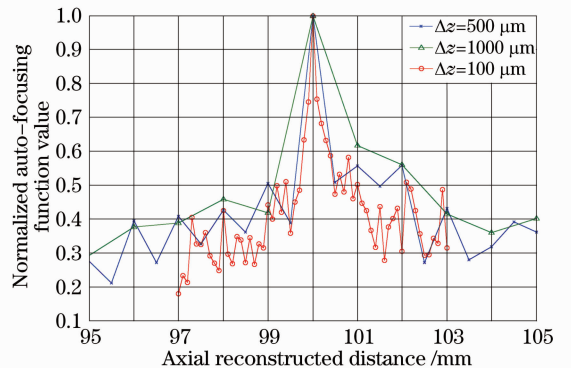


图 3 最大梯度自聚焦评价函数

Fig. 3 Auto-focusing evaluation function based on maxima gradient

参数: CCD 分辨率 $2032 \text{ pixel} \times 1520 \text{ pixel}$, 尺寸 $6.4 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$, 选用 He-Ne 激光器, 记录波长为 632.8 nm , 记录距离为 100 mm , 由(4)式可计算出焦深为 $618 \mu\text{m}$ 。从图中可以看出最大梯度自聚焦评价函数的单峰性较好, 即使在焦深范围内采样间隔为 $100 \mu\text{m}$ 时的最大梯度自聚焦评价函数仍然具有较好的单峰性。最大梯度自聚焦算法的粒子定位脉冲宽度基本上与轴向深度的采样间隔相同, 定位准确。图 4 给出了应用最大光强法对直径为 $500 \mu\text{m}$ 的单个粒子进行轴向定位的结果, 轴向采样间隔为 $500 \mu\text{m}$ 。可以看出聚焦曲线具有明显的双峰性, 双峰距离较宽, 通过双峰定位粒子轴向位置需要的粒子再现像面远大于最大梯度自聚焦算法, 而且定位存在一个采样间隔的偏差, 即 $500 \mu\text{m}$ 的误差。

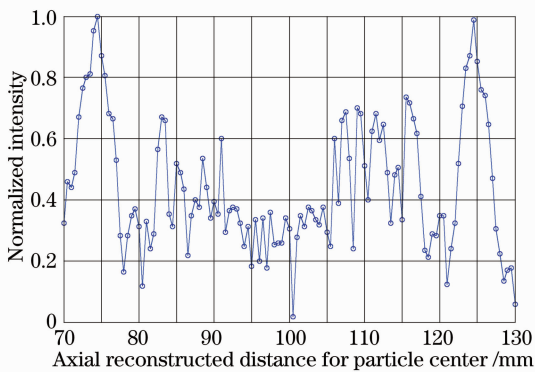


图 4 最大光强法聚焦评价函数

Fig. 4 Auto-focusing evaluation function based on maxima intensity

进一步选取直径分别为 $500 \mu\text{m}$ 和 $600 \mu\text{m}$ 且记录距离分别为 100 mm 和 105 mm 的两个球形粒子作为研究对象, 应用最大梯度自聚焦评价函数进行粒子轴向定位的结果如图 5 所示, 是在轴向采样间隔为 $500 \mu\text{m}$ 下的曲线。从图 5 可以看出应用最

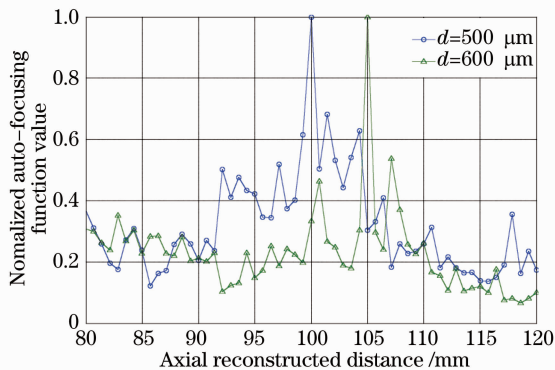


图 5 2 个粒子的最大梯度自聚焦评价函数

Fig. 5 Auto-focusing evaluation function based on maxima gradient for two particles

大梯度自聚焦评价函数能准确定位粒子的轴向深度位置, 而且自聚焦评价函数的单峰性较好, 粒子定位脉冲宽度基本与轴向采样间距基本一致。

通过以上实验研究可以看出, 在焦深较大的情况下, 粒子的数值再现过程中通过减小轴向采样间距并利用最大梯度自聚焦评价函数可以降低轴向定位误差, 提高定位精度。

粒子聚焦平面确定后, 通过边缘检测等数字图像处理手段可进一步计算出粒子的直径。图 6 为应用最大梯度自聚焦算法实现的粒径分布测量结果, 测量对象是粒径为 $50 \mu\text{m}$, 浓度为 $2 \text{ 个粒子}/\text{mm}^3$ 的标准颗粒溶液。在测量区域内共探测到 306 个粒子, 测量得到的粒径分布范围基本符合标准样品的粒径范围。

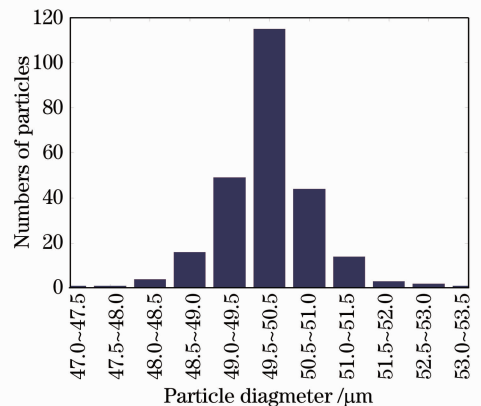


图 6 粒径柱状统计图

Fig. 6 Histogram of particles' diameter

4 结 论

粒子的轴向深度定位精度是获得粒子场高分辨力的再现像和高测量精度的前提保障, 但受到诸多因素的影响, 如焦深, 记录距离, 粒子尺寸, CCD 分辨率, CCD 尺寸和粒子场浓度等因素。其中焦深的影响较大, 焦深一般是粒径的几倍, 甚至百倍以上, 导致粒子轴向定位精度差。通过增大系统的数值孔径, 可以明显降低焦深, 减小记录距离是最佳、最实用的技术手段。

本文提出一种用于粒子轴向定位的基于最大梯度的自动聚焦算法。自动聚焦算法中通过选择适当大小的对焦窗口将再现粒子包含在内, 对粒子边缘识别区域的任意可能的梯度方向都求出它的梯度, 利用比较后得到最大的梯度, 作为自动聚焦判别数据。同时, 考虑到算法的精确度和稳定性, 引入了阈值参数。经仿真和实验表明, 该算法具有较好的单峰性和稳定

性,可减小焦深对粒子轴向定位精度的影响。

参 考 文 献

- 1 M. Adams, T. Kreis, W. Jüptner. Particle analysis with digital holography[C]. *SPIE*, 2000, **4101**: 314~319
- 2 Chen Pengfei, Li Zheren, Zhao Jianlin *et al.*. Simulation analysis of in-line digital holography for particles measurement[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(9): 1294~1298
陈鹏飞,李泽仁,赵建林等. 同轴全息术用于粒子场测量的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(9): 1294~1298
- 3 F. Palacios, J. Ricardo, D. Palacios *et al.*. 3D image reconstruction of transparent microscopic objects using digital holography[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **248**: 41~50
- 4 E. Malkiel, J. Sheng, J. Katz *et al.*. The three-dimensional flow field generated by a feeding calanoid copepod measured using digital holography[J]. *J. Experimental Biology*, 2003, **206**: 3657~3666
- 5 J. P. Fugal, R. A. Shaw, E. W. Saw *et al.*. Airborne digital holographic system for cloud particle measurements[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(32): 5987~5995
- 6 T. Li, K. Nishida, H. Hiroyasu. Characterization of initial spray from a D. I. gasoline injector by holography and laser diffraction method[J]. *Atomization and Sprays*, 2004, **14**: 477~494
- 7 G. Shen, R. Wei. Digital holography particle image velocimetry for the measurement of 3Dt-3c flows[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, **43**: 1039~1055
- 8 C. Fournier, C. Ducottet, T. Fournel. Digital holographic particle image velocimetry: 3D velocity field extraction using correlation[J]. *J. Flow Visualization & Image Processing*, 2004, **11**: 53~72
- 9 H. Meng, G. Pan, Y. Pu *et al.*. Holographic particle image velocimetry: from film to digital recording [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2004, **15**: 673~685
- 10 S. Coetmellec, C. B. Lefebvre, D. Lebrun *et al.*. Application of in-line digital holography to multiple plane velocimetry[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**(9): 1329~1379
- 11 M. Malek, D. Allano, S. Coëtmelec. Digital in-line holography: influence of the shadow density on particle field extraction[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(10): 2270~2279
- 12 G. Pan, H. Meng. Digital holography of particle fields: reconstruction by use of complex amplitude[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**: 827~833
- 13 J. Garcia, R. Castaneda. Spatial partially coherent imaging[J]. *J. Mod. Opt.*, 2002, **49**: 2093~2104
- 14 F. F. Medina, R. Castaneda, J. Garcia. Resolution, focus depth in the Fresnel-Fraunhofer domains [C]. *SPIE*, 2006, **6027**(60272I): 1~9