

激光干涉粒子成像测量干涉图处理算法研究

吕且妮 葛宝臻 陈益亮 张以谟

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 提出一种基于小波匹配滤波和傅里叶变换技术的干涉图条纹数/条纹间距的提取方法。该方法是先对粒子场干涉条纹图和粒子掩模图像,利用 Mexican Hat 小波分别提取其边缘图像,对所得到的边缘图像进行 2D 相关运算得到粒子的中心位置。根据粒子的中心坐标及粒子图像形状大小提取出单个粒子干涉图像。再对每个粒子干涉图像进行傅里叶变换,利用修正 Rife 方法提取条纹频率,得到粒子干涉条纹数/条纹间距,其测量精度可达亚像素精度,并进行了模拟和实验测量。当重叠系数 $\gamma < 11.62\%$ 时,算法识别率高于 90%,频率提取误差小于 0.0185%。对 51.1 μm 的标准粒子测量的不确定性为 $\pm 0.41 \mu\text{m}$,绝对误差 1.31 μm 。研究结果表明了该算法的可行性。

关键词 图像处理;干涉粒子成像;小波匹配滤波;傅里叶变换;修正 Rife 方法

中图分类号 TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0412009

An Algorithm for Interferometric Image Processing of Interferometric Particle Imaging

Lü Qieni Ge Baozhen Chen Yiliang Zhang Yimo

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information Science and Technology, Ministry of Education, College of Optoelectronics and Precision Instrument Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A method of extracting the number of fringes/fringe spacing of interferogram based on wavelet matched filtering and Fourier transform technique is proposed. The edge images of the interference pattern of particle and the particle mask image are detected respectively by Mexican Hat wavelet and the center of particle can be extracted through the 2D correlation operation for the two edge images obtained. Then the interference pattern of each particle can be achieved using the center coordinate, shape and size of the particle image. The fringe counting/fringe spacing of the interferogram of a particle is obtained by Fourier transform and the modified Rife algorithm, and sub-pixel accuracy of the extracted frequency is acquired. The performance of the method is demonstrated using simulation and experimental measurements. The simulation results are that the recognition ratio is more than 90% and the extracted frequency error is less than 0.0185% for the overlap coefficient $\gamma < 11.62\%$. The measurement uncertainty is $\pm 0.41 \mu\text{m}$ and the absolute error is 1.31 μm for the standard particles of diameter of 51.1 μm . The research results show that the algorithm presented in this paper is feasible.

Key words image processing; interferometric particle imaging (IPI); wavelet matched filtering; Fourier transform; modified Rife algorithm

OCIS codes 100.3175; 290.5825; 290.5850; 120.5820

1 引言

激光干涉粒子成像测量技术(IPI)是一种相对较新的粒子尺寸测量方法,其基本原理是基于 Mie

散射理论,通过测量粒子散射光干涉条纹图的条纹数或条纹频率得到粒子尺寸大小,其测量精度依赖于图像处理技术。因此,从干涉图像中自动提取干

收稿日期: 2010-11-01; 收到修改稿日期: 2010-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(60677034)资助课题。

作者简介: 吕且妮(1966—),女,博士,副教授,主要从事于数字全息、粒子测量等方面的研究。

E-mail: qienil@tju.edu.cn(中国光学学会会员号:S040111640S)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

涉条纹信息是 IPI 测量技术的难点和关键,特别是当粒子浓度较高时,由于条纹图的高度重叠,从而使图像处理更加困难。目前已提出了多种图像处理方法^[1~10],如 Glover^[3]等采用高斯模糊运算,Canny算子提取边缘,Hough 变换定位粒子中心,再对每一粒子的一维光强分布进行最小二乘法拟合提取条纹频率。Niwa 等^[4]利用模版匹配方法定位粒子,对粒子干涉图像进行傅里叶变换和高斯插值得到条纹频率。Hardalupas 等^[5]利用不同伸缩因子的连续 Mexican Hat 小波函数,分别对粒子的聚焦像和离焦像沿水平方向进行小波变换,大的变换因子的最大值对应于条纹图像的中心,小的变换因子的最大值对应于强度调制,得到每个条纹图像,再对每个条纹图沿水平方向进行傅里叶变换得到条纹频率。文献^[6]利用卷积定位和傅里叶变换技术提取粒子干涉条纹图的中心和条纹频率。文献^[7,8]设计一种图像压缩光路系统,将粒子干涉图由 2D 的圆形条纹图压缩为 1D 的线形条纹图,再对 1D 图像进行傅里叶变换和高斯拟合得到条纹频率。Damaschke 等^[9]从实验的角度对粒子进行定位。利用两个 CCD 相机同时记录粒子场的聚焦像和离焦像,从聚焦像中检测并定位粒子,在离焦图像中提取对应的粒子干涉条纹图,对其进行傅里叶变换得到条纹频率。最近,Quérel 等^[10]提出一种基于 1D 傅里叶变换技术的实时激光干涉粒子尺寸测量算法,用于大气水滴粒子尺寸分布测量。本文提出一种基于小波

匹配滤波和傅里叶变换技术的激光干涉粒子图像处理算法,利用修正 Rife 算法可得到亚像素精度的条纹频率信息,对这种算法进行模拟和实验,给出了相应的研究结果。

2 IPI 技术

图 1 所示为激光干涉粒子成像测量示意图,激光照射球形透明粒子,来自于粒子表面反射和经粒子后折射的散射光,在聚焦粒子像面上形成两点像,其中一个为反射光的聚焦像,一个为折射光的聚焦像;在离焦像面上形成干涉条纹图。粒子干涉条纹图的形状取决于收集系统孔径的形状,其大小 d_i 为

$$d_i = d_a \left| 1 - z_r \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{z_o} \right) \right|, \quad (1)$$

式中 d_a 为成像透镜孔径大小, f 为成像透镜焦距, z_o 为物距, z_r 为离焦像面距离成像透镜的距离,如图 1 所示,与粒子尺寸无关。粒子直径与两亮点之间的间距或条纹间距有关。根据几何光学理论,粒子直径 d 与条纹数 / 条纹间距关系式为^[11]

$$d = \frac{2\lambda N}{\alpha} \left[\cos \frac{\theta}{2} + \frac{m \sin(\theta/2)}{\sqrt{m^2 - 2m \cos(\theta/2) + 1}} \right]^{-1}, \quad (2)$$

式中 θ 为散射角, α 为光学系统的收集角, m 为相对折射率, λ 为激光波长, $N = \alpha / \Delta\varphi$ 为条纹数, $\Delta\varphi$ 为干涉条纹角间距。

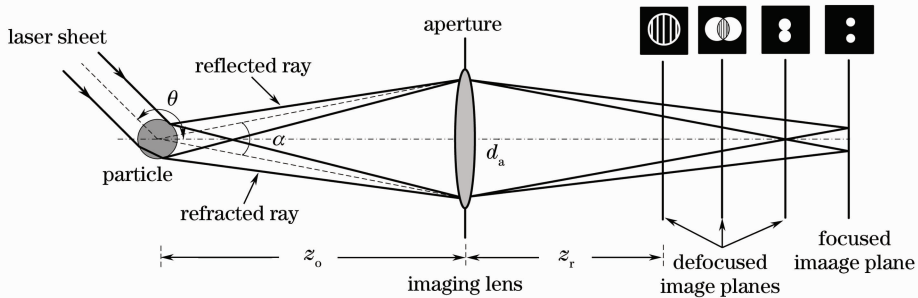


图 1 粒子散射光干涉成像示意图

Fig. 1 Schematic of interferometric imaging of particle scattering light

由(2)式可知,在实验系统给定的条件下,即 θ , m , λ 和 α 给定,粒子的直径 d 正比条纹数 N 。通过测量 N 或 $\Delta\varphi$,可得到 d 。因此,粒子尺寸测量的精度依赖于图像处理技术。从干涉条纹图中自动提取条纹数/条纹间距是 IPI 测量技术研究的重点内容之一。

3 干涉图像处理算法

图 2 是本文提出的干涉粒子成像测量图像自动

处理算法的流程图,对粒子干涉条纹图和粒子掩模图像[根据(1)式构造一粒子掩模图],利用 Mexican Hat 小波分别提取其边缘图像,对所得到的边缘图像进行相关运算得到粒子的空间位置坐标。根据粒子的中心坐标及粒子图像形状大小提取出单个粒子干涉图像,再对每个粒子干涉图像进行傅里叶变换,利用修正 Rife 方法得到干涉条纹数 N /条纹角间距 $\Delta\varphi$,进而计算得到粒子的直径。

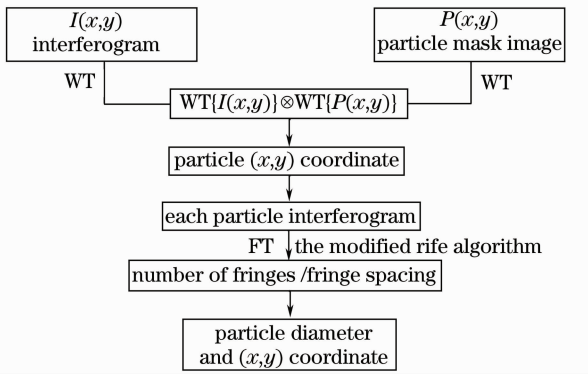


图 2 粒子测量流程图

Fig. 2 Flow chart of particle measurement

3.1 干涉条纹图定位算法

小波变换在图像边缘提取等领域有广泛的应用^[12~16],小波匹配是指对待识别图像和输入图像分别进行小波变换,提取各自图像的边缘特征,再对所得的边缘图像进行相关运算。设粒子的干涉条纹图 $I(x,y)$ 为输入图像,粒子掩模图 $P(x,y)$ 为待识别的目标图像,则其小波变换分别为

$$W_{a,x,y}\{I(x,y)\} = a \iint I'(u,v) H^*(au,av) \times \exp[i2\pi(ux + vy)] dudv, \quad (3)$$

$$W_{a,x,y}\{P(x,y)\} = a \iint P'(u,v) H^*(au,av) \times \exp[i2\pi(ux + vy)] dudv, \quad (4)$$

式中 $H(u,v)$ 为小波函数 $h(x,y)$ 的傅里叶变换, $I'(u,v)$ 和 $P'(u,v)$ 分别为 $I(x,y)$ 和 $P(x,y)$ 的傅里叶变换。设小波函数 $h(x,y)$

$$h(x,y) = \frac{1}{2\pi} (2 - x^2 - y^2) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2}\right), \quad (5)$$

为 Mexican Hat(墨西哥帽)小波函数,其傅里叶变换为

$$H(u,v) = 4\pi^2 (u^2 + v^2) \exp[-2\pi(u^2 + v^2)]. \quad (6)$$

对 $W_{a,x,y}\{I(x,y)\}$ 和 $W_{a,x,y}\{P(x,y)\}$ 进行互相关运算,即为

$$W_{a,x,y}\{I\} \otimes W_{a,x,y}\{P\} = a \iint I'^*(u,v) H(au,av) \times P'(u,v) H^*(au,av) \exp[i2\pi(ux + vy)] dudv, \quad (7)$$

式中的相关峰值处即为粒子干涉条纹图的中心位置。

3.2 条纹频率提取算法

基于小波匹配定位算法提取出每个粒子的干涉条纹图中心坐标后,利用粒子的中心坐标及粒子图像形状大小提取出单个粒子干涉图像,再对每个粒

子干涉图进行 2D 傅里叶变换。由于得到的是离散频谱图,频率估计精度受到 FFT 频率分辨率的限制^[16~18],因此采用修正 Rife 方法^[18]对频率进行亚像素细分,以提高频率估计的精度。

设信号 $s(n)$ 的离散傅里叶变换为 $S(k)$,即为

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \exp\left(-i \frac{2\pi nk}{N}\right), \quad (8)$$

式中 $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$, N 为采样数。设 $S(k)$ 幅度最大值处的离散频率点为 k_1 ,对应的幅值为 A_1 ,次极大值处的离散频率点为 $k_2 = k_1 \pm 1$,对应的幅值为 A_2 ,引入参数 δ

$$\delta = \frac{A_2}{A_1 + A_2}. \quad (9)$$

若 δ 满足

$$\frac{1}{3} < |\delta| < \frac{2}{3}, \quad (10)$$

则所求的频率 f 为

$$f = \frac{(k_1 + r\delta)}{N\Delta x}, \quad (11)$$

式中 Δx 为采样间隔。当 $k_2 = k_1 + 1$ 时, $r = 1$; 当 $k_2 = k_1 - 1$ 时, $r = -1$ 。若(10)式不成立,则对 $s(n)$ 进行频移

$$\Delta\delta = \frac{1}{2} - |\delta|, \quad (12)$$

$$s_1(n) = s(n) \exp\left(i \frac{2\pi n}{N} r \Delta\delta\right), \quad (13)$$

对(13)式再重复(8)~(11)式的步骤进行频率估计。

对激光干涉条纹图,采用修正 Rife 算法提取频率,仅对 x 轴方向进行频移,即为

$$I_1(x,y) = I(x,y) \exp\left(i \frac{2\pi x}{N} r \Delta\delta\right). \quad (14)$$

4 数值模拟

4.1 干涉条纹图的定位

先通过计算机模拟验证本文所提出的干涉图像处理算法的可行性。图 3 为粒子场的模拟结果,模拟参数:成像镜头孔径为圆形,焦距 $f = 50$ mm,光圈数 $F = 1.8$, CCD 像素尺寸 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$,像素数 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$,成像系统放大率 $M = 0.4$, CCD 靶面到聚焦像面的距离 1.5 mm,则 $z_r = 68.5$ mm。图 3(a)为计算机模拟的粒子场干涉条纹图,30 个球形粒子随机地分布在成像视场中。图 3(b)为粒子掩模图像,其大小为 80 pixel 。对图 3(a),(b)分别利用 Mexican Hat 小波函数进行边缘提取,得到图 3(c)和图 3(d)。图 3(e)为图 3(c)和

图 3(d)互相关输出。图 3(f)给出了粒子定位结果,图中红色亮点表示得到的圆心坐标。比较图 3(a)和

图 3(f),可看出图 3(f)完全正确的给出了图 3(a)中粒子干涉图像的位置信息。

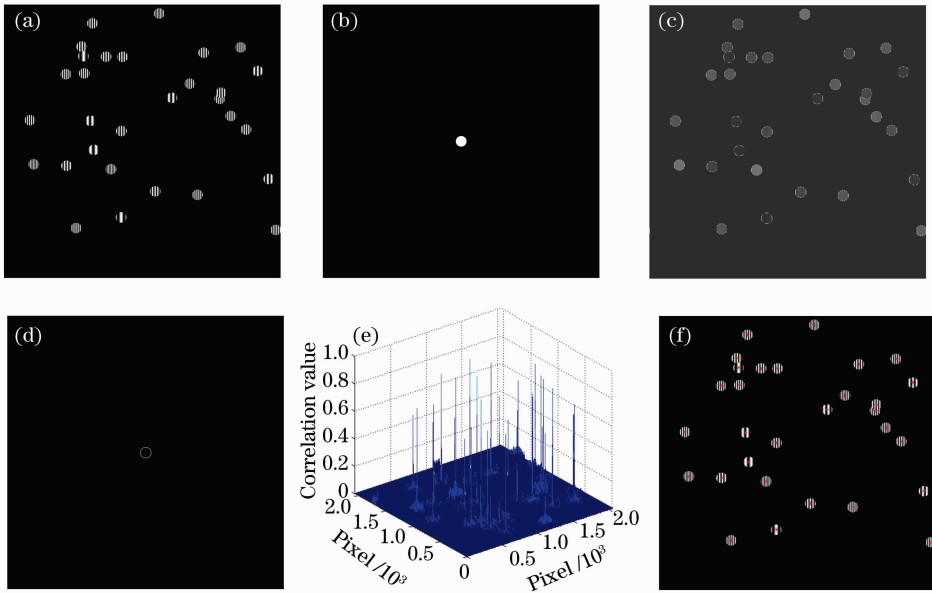


图 3 干涉图定位模拟结果。(a)干涉条纹图,(b)粒子掩模图,(c)和(d)小波变换提取的边缘,(e)相关结果,(f)定位结果
Fig. 3 Simulation results of the interferogram center location. (a) interferogram imgs, (b) mask image of particle, (c) and (d) edge extraction with wavelet transform, (e) distribution of cross-correlation value and (f) results of the center location

定义两个参数:粒子识别率和重叠系数 γ 。粒子识别率为算法识别出的粒子数目与视场中所有的粒子数目的比值;重叠系数 $\gamma^{[19]}$ 为所有干涉图重叠部分的面积与它们总面积的比值,它与系统参数及粒子场浓度有关。当其他条件不变时,粒子场的浓度越大,粒子干涉条纹图越容易重叠,重叠系数越大,导致算法识别率降低。图 4 为算法识别率与重叠系数 γ 的曲线图,当 $\gamma < 17.87\%$ 时,算法识别率高于 80% ,对应的粒子场浓度为 0.1905 个/ mm^3 ;当 $\gamma < 11.62\%$ 时,算法识别率高于 90% ,对应的粒子场浓度为 0.1209 个/ mm^3 。图 5 为粒子数分别为 50,100,200 和 400 时,基于小波匹配算法的粒子定位结果。图 6 分别给出在 x 和 y 方向上粒子位置测

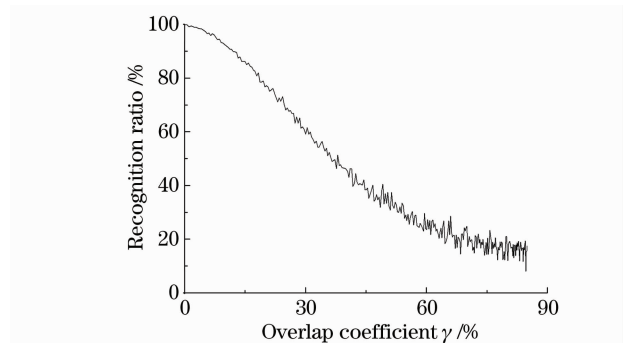


图 4 算法识别率随重叠系数变化曲线
Fig. 4 Variation of algorithm recognition ratio with respect to overlap coefficient

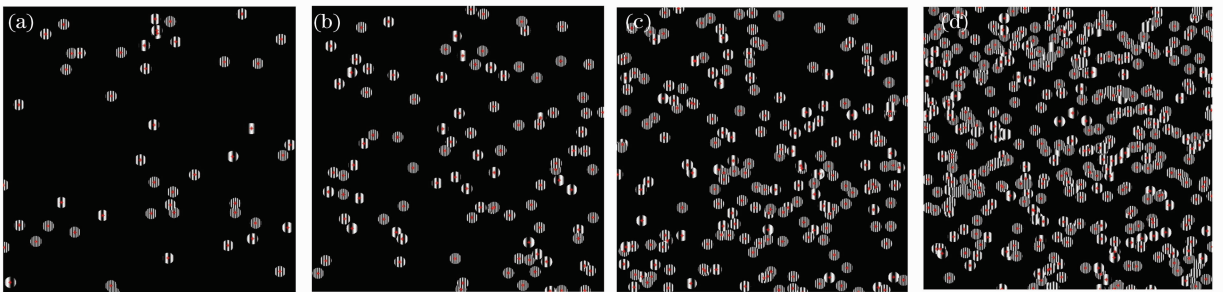


图 5 基于小波匹配滤波的定位结果,粒子数分别为(a) 50,(b) 100,(c) 200,(d) 400
Fig. 5 Results of the center location by wavelet matched filtering (WMF) for different number of particles: (a) 50,(b) 100,(c) 200,(d) 400

量结果,图中横坐标(x_0/y_0)表示预设的粒子坐标,纵坐标(x/y)表示探测的粒子位置, $x/x_0 = 1$, $y/y_0 \approx 1$ 。当粒子浓度较高时,个别粒子定位出现偏

差。由图 5 和图 6 可知,利用本文所提的粒子定位方法,可得到准确的粒子(x, y)位置信息。

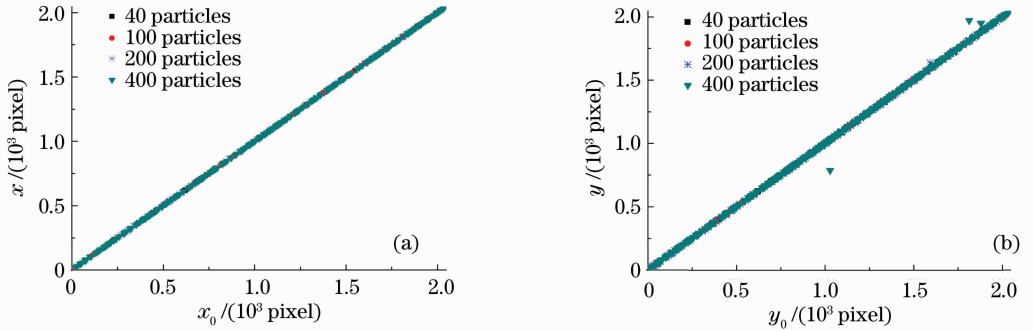


图 6 粒子位置的测量值与设置值的比较。(a) x 坐标,(b) y 坐标

Fig. 6 Particle position detected vs the preset values. (a) x coordinate, (b) y coordinate

4.2 条纹频率提取

图 7(a)为计算机模拟的粒子干涉条纹图样,条纹圆的直径为 200 pixel, $\Delta x = 1$, 条纹频率为 0.05 lp/pixel, 高斯噪声方差为 0.1。图 7(b)为其 2D 傅里叶频谱图,图 7(c)为 x 轴方向的 1D 傅里叶频谱,极大值对应的离散频率点 $k_1 = 101 - 91 = 10$,

次极大值对应的 $k_2 = 101 - 90 = 11, r = 1$, 计算得 $\delta = 0.1836$, 不满足(10)式,所以需要对其进行频移。图 7(d)为频移后的 1D 傅里叶变换,计算得 $\delta = 0.3862$, 满足(10)式的条件。利用(11)式,求得的频率为 $f = 0.0501$ lp/pixel, 如图 7(e)所示。

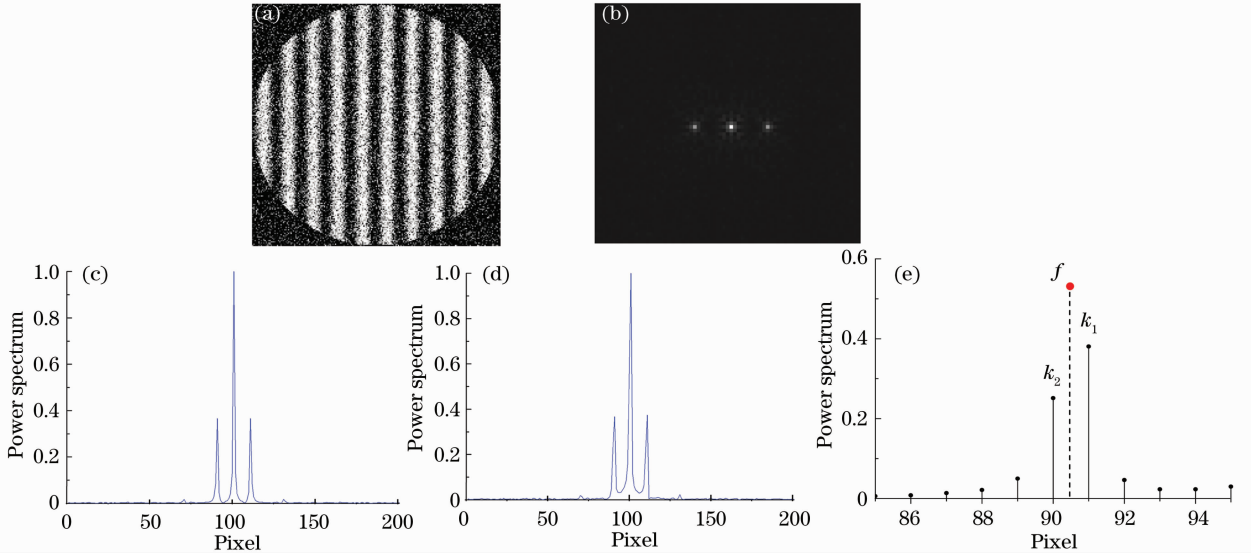


图 7 条纹频率提取模拟结果。(a)干涉条纹图,(b)和(c)分别为图(a)的 2D 和 1D 频谱图,(d)频移后干涉图的 1D 傅里叶谱,(e)图(d)中的-1 级谱

Fig. 7 Simulation results of the fringe frequency extraction. (a) interferometric image, (b) and (c) 2D and 1D frequency spectrum of Fig. (a) respectively, (d) 1D frequency spectrum after frequency shift of Fig. (a) and (e) -1 order spectrum of Fig. (d)

图 8 给出了利用高斯插值、修正高斯插值、Rife 方法、修正 Rife 算法、三次 B 样条插值提取条纹频率的均方根误差(RMSE)和均值绝对误差(MAE)。从模拟结果可以看出,这几种算法的 RMSE 相差无几,但是修正 Rife 算法的 MAE 在很大范围内优于其它几种算法。

5 实验及结果

搭建激光干涉粒子成像测量实验光路系统。实验所用的激光器为波长 $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$, 最大为功率 1.5 W 的半导体激光器。激光器发出的细光束经扩束、针孔滤波、准直和柱面镜后压缩为厚度 1.25 mm

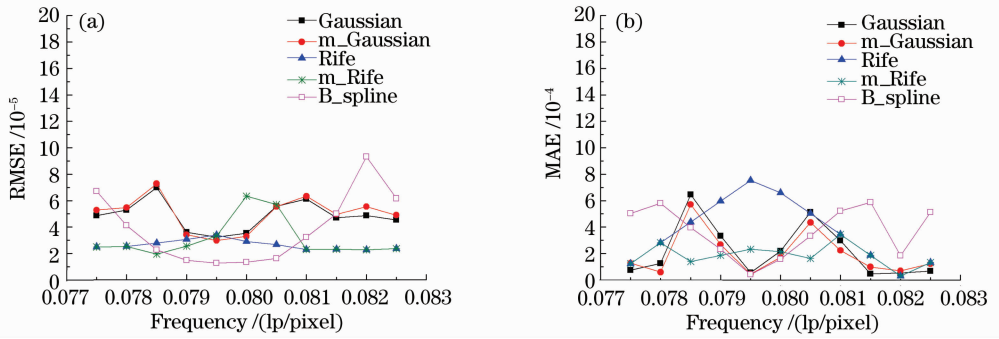


图 8 误差曲线图。(a) RMSE,(b) MAE

Fig. 8 Error curve. (a) RMSE, (b)MAE

的片状光束。CCD 为 DALSA 公司生产的 DS-21-04M15 型 10 位的 CCD,像素尺寸 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$,像素数 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 。成像镜透为尼康 AF 50 mm $f/1.8D$ 定焦镜头。实验中所用的粒子为直径 $d=51.1 \mu\text{m}$ GBW(E)120046 的标准粒子,折射率 $n=1.59$,实验时将其悬浮于去离子水中。实验中设定空气中散射角 $\theta=45^\circ$,放大率 $M=0.1624$,收集角 $\theta=4.45^\circ$, $z_r=56.67 \text{ mm}$ 。由(1)式计算得到的粒子掩模图为直径 93.65 pixel 的圆。但由于在散射角 $\theta=45^\circ$ 处,粒子的干涉条纹图大小并不完全相同[如图 9(a)所示],所以构造的粒子掩模图为直径 66~106 pixel 的圆。图 9(a)所示为记录的标准粒子干涉图,每个干涉图中的条纹数均相同,约为 4 条。利用图 4 所示的粒子尺寸测量方法,对粒子干

涉图进行 Mexican Hat 小波变换和相关运算得到每个粒子中心坐标,图 9(b)为小波匹配滤波相关结果,图 9(c)为粒子定位结果。对每个粒子的干涉条纹图进行傅里叶变换和修正 Rife 方法的插值计算,得到粒子干涉条纹角间距 $\Delta\varphi$ /条纹数 N 。图 9(d)和图 9(e)给出了一个粒子条纹图及其傅里叶频谱图,其 1D 频谱分布如图 9(f)所示。频谱图中零级与一级频谱之间的距离即为干涉条纹的振荡频率,通过修正 Rife 算法求出条纹频率为 0.0645 lp/pixel,条纹数 $N=5.68$ 条,条纹角间距 $\Delta\theta=114.73 \mu\text{m}$,利用(2)式计算得到粒子直径 $d_p=49.86 \mu\text{m}$ 。对图 9(a)中的所有粒子干涉图进行处理,得到的粒子直径 $d=49.79 \pm 0.41 \mu\text{m}$,绝对误差 $1.31 \mu\text{m}$,相对误差 2.56%。

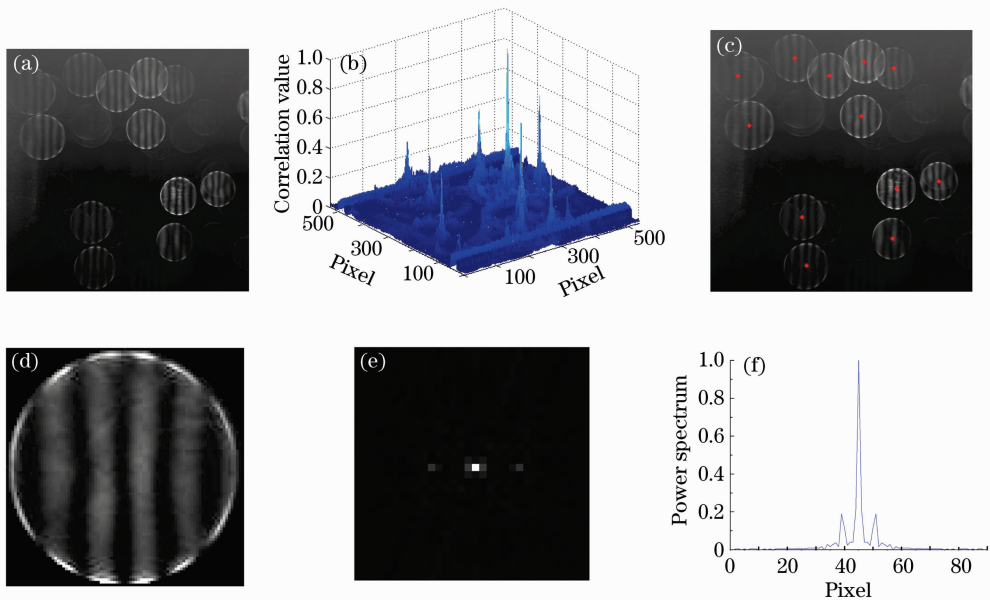


图 9 标准粒子测量结果。(a)干涉条纹图,(b)小波匹配滤波相关结果,(c)粒子定位结果,(d)~(f)单个粒子的条纹图及其频谱图

Fig. 9 Measurement results of the standard particles. (a) interferometric image, (b) cross-correlation value of WMF, (c) result of the center location, (d)~(f) an interferometric image of a particle in Fig. (a) and 2D and 1D frequency spectrum of Fig. (d)

6 结 论

在 IPI 测量中, 从干涉条纹图中自动提取条纹数/条纹间距是 IPI 测量技术的关键。本文提出了一种基于小波匹配滤波和傅里叶变换技术的 IPI 测量图像自动处理算法, 利用修正 Rife 方法对频率进行亚像素细分, 其测量精度可达到亚像素精度, 从理论和实验方面对该算法进行了研究。模拟分析表明, 当重叠系数 $\gamma < 11.62\%$ 时, 识别率高于 90% , 对应的粒子场浓度为 0.1209 个/ mm^3 , 频率提取误差小于 0.0185% , 有效的解决了 IPI 技术的图像处理问题。对 $51.1 \mu\text{m}$ 的标准粒子进行了测量, 粒径测量值为 $d = 49.79 \pm 0.41 \mu\text{m}$, 绝对误差 $1.31 \mu\text{m}$ 。研究结果表明了该算法在粒子场测量中的可行性, 可用于雾场粒子尺寸位置测量。

参 考 文 献

- 1 K. Jorabchi, R. G. Brennan, J. A. Levine *et al.*. Interferometric droplet imaging for in situ aerosol characterization in an inductively coupled plasma[J]. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2006, **21**(9): 839~846
- 2 A. Graßmann, F. Peters. Size measurement of very small spherical particles by Mie scattering imaging(MSI)[J]. *Part. Part. Syst. Charact.*, 2004, **21**(5): 370~389
- 3 A. R. Glover, S. M. Skippon, R. D. boyle. Interferometric laser imaging for droplet sizing: a method for droplet-size measurement on sparse spray systems[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(36): 8409~8421
- 4 Y. Niwa, Y. Kamiya, T. Kawaguchi *et al.*. Bubble sizing by interferometric laser imaging [C]. Proc. 10th Int. Symp. on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, 2000, 1 ~ 11, http://in3.dem.ist.utl.pt/downloads/lxaser2000/pdf/38_1.pdf
- 5 Y. Hardalupas, S. Sahu, A. M. K. P. Taylor *et al.*. Simultaneous planar measurement of droplet velocity and size with gas phase velocities in a spray by combined ILIDS and PIV techniques [J]. *Exp. Fluids*, 2010, **49**(2): 417~437
- 6 Pu Shiliang, Pu Xiangguo, Yuan Zhenfu *et al.*. A automatic image processing method for the interferometric laser imaging droplet sizing (ILIDS) technique[J]. *Proc. CSEE*, 2004, **24**(2): 201~205
浦世亮, 浦兴国, 袁镇福等. 激光干涉气液两相流测量图像自动判读方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, **24**(2): 201~205
- 7 M. Maeda, T. Kawguchi, K. Hishida. Novel interferometric measurement of size and velocity distributions of spherical particles in fluid flows[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2000, **11**(12): L13~L18
- 8 M. Maeda, Y. Akasaka, T. Kawaguchi. Improvements of the

- interferometric technique for simultaneous measurement of the droplet size and velocity vector field and its application to a transient spray[J]. *Exp. Fluids*, 2002, **33**(1): 125~134
- 9 N. Damaschke, H. Nobach, T. I. Nonn *et al.*. Multi-dimensional particle sizing technique [J]. *Exp. Fluids*, 2005, **39**(2): 336~350
- 10 A. Quérel, P. Lemaitre, M. Brunel *et al.*. Real-time global interferometric laser imaging for the droplet sizing (ILIDS) algorithm for airborne research[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2010, **21**(1): 015306-1~9
- 11 K. H. Hesselbacher, K. Anders, A. Frohn. Experimental investigation of Gaussian beam effects on the accuracy of a droplet sizing method[J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(33): 4930~4935
- 12 Zhou Xiang, Zhao Hong. Three dimensional profilometry based on Mexican hat wavelet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 197~202
周翔, 赵宏. 基于 Mexican hat 小波变换的三维轮廓术[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 197~202
- 13 Qin Hanlin, Zhou Huixin, Liu Shangqian *et al.*. Nonlinear enhancement algorithm for infrared image based on second generation wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 353~356
秦翰林, 周慧鑫, 刘上乾等. 基于二代小波变换的红外图像非线性增强算法[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 353~356
- 14 Zhan Bichao, Wu Yiquan, Ji Shouxin. Infrared image enhancement method based on stationary wavelet transformation and Retinex [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2788~2793
占必超, 吴一全, 纪守新. 基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 2788~2793
- 15 Li Xiaofeng, Xu Jun, Zhang Shengxiu *et al.*. Edge detection algorithm of laser active imaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1599~1601
李晓峰, 徐军, 张胜修等. 激光主动成像图像边缘检测方法[J]. 中国激光, 2010, **37**(6): 1599~1601
- 16 Jia Fangxiu, Ding Zhenliang, Yuan Feng *et al.*. Real time laser range finding system for moving target based on all phase Fourier transform spectrum analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2928~2934
贾方秀, 丁振良, 袁峰等. 基于全相位快速傅里叶变换谱分析的激光动态目标实时测距系统[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 2928~2934
- 17 Qi Guoqing. Accuracy analysis and comparison of some FFT-based frequency estimators [J]. *J. Vibration Eng.*, 2006, **19**(1): 86~92
齐国清. 几种基于 FFT 的频率估计方法精度分析[J]. 振动工程学报, 2006, **19**(1): 86~92
- 18 Deng Zhenmiao, Liu Yu, Wang Zhizhong. Modified Rife algorithm for frequency estimation of sinusoid wave[J]. *J. Data Acquisition & Processing*, 2006, **21**(4): 473~477
邓振淼, 刘渝, 王志忠. 正弦波频率估计的修正 Rife 算法[J]. 数据采集与处理, 2006, **21**(4): 473~477
- 19 N. Damaschke, H. Nobach, C. Tropea. Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics[J]. *Exp. Fluids*, 2002, **32**(2): 143~152