

文章编号:1004-4213(2010)05-0881-7

数字同轴全息颗粒场检测中的颗粒分割 识别与独立聚焦*

徐元强^{1,2}, 王玉荣^{1,†}, 丁海生¹

(1 山东大学 信息科学与工程学院, 济南 250100)

(2 中国人民解放军 72690 部队, 山东 泰安 271000)

摘要:针对数字同轴全息颗粒场检测中不同层面颗粒的自动聚焦问题,通过分析颗粒场数字同轴全息记录与再现的特点,提出一种颗粒分割识别与独立聚焦方法.给出了对单个颗粒进行聚焦判断的独立聚焦判据函数、以及实现颗粒分割识别和独立聚焦的方法.通过单层单个、两层两个及多层多个颗粒场的实验,验证了所提出方法的正确性.

关键词:同轴数字全息;颗粒场检测;聚焦判据函数;颗粒分割识别;独立聚焦

中图分类号:O438.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103905.0881

0 引言

同轴全息^[1]光路简单、受环境振动和扰动影响小、对光源相干性要求低.数字同轴全息^[2-7]易于实现实时化测量和定量分析,已应用于各种颗粒场检测以及燃烧、爆炸、超音速风洞等复杂流场显示与测量的研究^[8-13].由于实际的记录距离难于精确测量,所以在数字再现过程中为了得到最清晰的再现像需要施加一个聚焦判据函数^[14-25].文献^[14-22]中提出的方法均是把整个再现像面作为一个整体进行判断,适用于单个物体或多个物体位于同一平面时的成像聚焦,不适用于多个物体位于不同面上的情况(如颗粒场).Li 等人^[23]提出了基于频谱 l_1 范数的聚焦判据函数,Tachiki 等人^[24]、罗振雄等人^[25]分别通过再现像面单元分割、种子生长方法实现颗粒的自动分割.

在数字同轴全息用于颗粒场检测时,大量颗粒同时存在于一定的三维立体空间、位于不同的层面内,给聚焦判别带来很大困难.本文针对这一问题,提出了一种新的聚焦检测方法——颗粒分割识别与独立聚焦方法,其基本思想是基于:在大多数的颗粒场检测应用中,颗粒是不透明的、可以看作是一个二值化的纯振幅型物体,当对某一个颗粒刚好聚焦成像时,再现像面上该颗粒所占据区域内的振幅或强度和最大、其波动最小;为了做到对颗粒场中的每个颗粒都能聚焦,可以先对颗粒场中的每个颗粒进行

初步的分割识别,然后再对每个颗粒独立地进行聚焦判别.该方法的优点是:颗粒识别与独立聚焦相结合,聚焦准确,分层再现不同聚焦面上的聚焦颗粒,更易于实现对颗粒的分类统计.

1 颗粒场的数字同轴全息记录与再现

如图 1,物面(颗粒场所在位置)与全息记录面(CCD 靶面)的距离为 z_0 ,设物面光场分布为 $o(x, y)$,则经衍射后在记录面上的物光场分布 $o_d(x, y)$

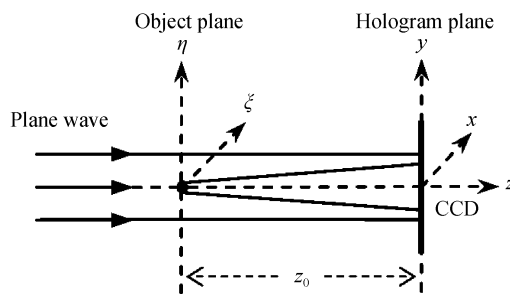


图 1 颗粒场的数字同轴全息记录

Fig. 1 Digital in-line holographic recording of particle fields

可以表示为

$$o_d(x, y) = h(x, y; z_0) * * o(x, y) \quad (1)$$

式中,符号 $* *$ 表示卷积运算; $h(x, y; z_0)$ 是衍射传播点扩散函数,在非涅尔衍射近似下表示为

$$h(x, y; z_0) = \frac{\exp(jkz_0)}{j\lambda z_0} \exp\left(\frac{jk}{2z_0}(x^2 + y^2)\right) \quad (2)$$

设颗粒场中的颗粒是不透明的,不考虑每个颗粒的轴向厚度,只考虑垂轴方向的截面,用 $a(x, y)$ 表示颗粒截面所占据的区域,当 (x, y) 位于颗粒所占据区域时 $a(x, y) = 1$,当 (x, y) 位于颗粒所占据区域之外时 $a(x, y) = 0$.用单位振幅平面光波照射

* 国家自然科学基金(60777008)资助

† Tel:0531-88361208

Email:yrw@sdu.edu.cn

收稿日期:2009-06-16

修回日期:2009-10-12

物面,则物面上的光场分布 $o(x,y)$ 和记录面上的光场分布可以分别表示为

$$o(x,y) = 1 - a(x,y) \quad (3)$$

$$o_d(x,y) = h(x,y; z_0) * * o(x,y) = 1 - h(x,y; z_0) * * a(x,y) \quad (4)$$

在得出式(4)时用到了 $h(x,y; z_0) * * 1 = 1$. 式(4)表明到达记录面的光波场由两部分组成,一部分是第一项表示的直透光波,另一部分是第二项表示的由颗粒形成的衍射光波. 二者相互干涉在记录面上形成全息图,其强度分布为

$$I_H(x,y) = |o_d(x,y)|^2 = 1 - h(x,y; z_0) * * a(x,y) - h^*(x,y; z_0) * * a(x,y) + |h(x,y; z_0) * * a(x,y)|^2 \quad (5)$$

该强度分布由 CCD 记录、并用计算机进行处理和数字再现. 在式(5)中,上标 * 表示复共轭;第一项是直透平面光波的强度分布;第二、三项是直透平面光波与颗粒衍射光波的干涉,均含有粒子场的分布 $a(x,y)$,是再现颗粒场所需要的;第四项颗粒衍射光波自身的强度分布,当满足衍射近似条件时,该项是较弱的慢变化的强度分布,对再现的影响较小. 在进行数字再现前,减去直透光的强度分布并略去第四项,可以得到

$$I'_H(x,y) = h(x,y; z_0) * * a(x,y) + h^*(x,y; z_0) * * a(x,y) \quad (6)$$

数字再现相当于模拟全息图在单位振幅平面波照射下的衍射过程,再现的光场分布为

$$a_R(x,y) = I'_H(x,y) * * h(x,y; z_R) \quad (7)$$

式中下表 R 表示再现, z_R 表示再现时的距离. 因为有 $h(x,y; z) * * h(x,y; z) = h(x,y; 2z)$ 和 $h(x,y; z) * * h^*(x,y; z) = \delta(x,y)$ 成立,所以当 $z_R = z_0$ 时由式(6)和(7)可得

$$a_R(x,y) = h(x,y; 2z_0) * * a(x,y) + \delta(x,y) * * a(x,y) \quad (8)$$

式(8)中,第二项是再现的颗粒场的像;第一项是共轭像,它相当于颗粒场在更远距离 $2z_0$ 处的衍射光场分布,在再现像面处的强度分布比较弱且是慢变化的,对于再现不透明的颗粒场分布来说,可以通过取适当的阈值将其去掉.

由式(8)可知,对于存在于一定三维立体空间的颗粒场分布,当再现距离在 z_0 附近取不同值时可以再现不同层面上的颗粒分布. 获得数字同轴全息图后,在计算机数值再现过程中可以很方便地改变再现距离(数字调焦),从而获得三维颗粒场的分布.

2 聚焦判据函数

在进行数字再现前,用全息图的强度分布减去

直透光的强度分布,不仅可减少直透光对再现像的影响,还可以使再现的颗粒的像发生对比度反转,即在再现像面上颗粒是亮的(对应高灰度值)、背景是暗的(对应低灰度值). 当再现距离刚好使某个颗粒聚焦成像时,在该颗粒占据的区域内总光强应为最大、强度起伏变化应为最小. 基于此,单个颗粒的聚焦判断可以采用式(9)和(10)所表示的函数

$$V_1(z) = \frac{1}{M} \sum_i^M I_z(i, z) \quad (9)$$

$$V_V(z) = \frac{1}{M} \sum_i^M (I_z(i, z) - \overline{I_z(i, z)})^2 \quad (10)$$

式中, z 是再现距离; M 是颗粒占据区域内的像素总数目, $I_z(i, z)$ 是颗粒占据区域内第 i 个像素的强度值, $\overline{I_z(i, z)}$ 是颗粒占据区域内所有像素强度的平均值. 式(9)是以颗粒占据区域内总强度值为判据的聚焦判据函数,使 $V_1(z)$ 取最大值的 z 值是最佳聚焦距离. 式(10)是以颗粒占据区域内强度起伏变化的均方差值为判据的聚焦判据函数,使 $V_V(z)$ 取最小值的 z 值是最佳聚焦距离. 式(9)和(10)给出的聚焦判据与已有文献[15]给出的聚焦判据刚好相反,原因是该文献中给出的聚焦判据函数是针对整个再现像面的,整个再现像面上既包含待测物体的像又有背景;而式(9)和(10)给出的聚焦判据是限定在颗粒占据的区域内.

3 颗粒分割识别与独立聚焦的原理及实现过程

在采用数字同轴全息进行颗粒场检测时,颗粒场中存在多个颗粒、并且这些颗粒可能位于不同层面上. 在运用式(9)或(10)进行聚焦判断前,要先进行颗粒的分割识别,然后对每个颗粒进行独立聚焦判别. 颗粒分割识别与独立聚焦的原理和步骤为:

第一步,对全息图进行预处理,得到预处理后的全息图 $I'_H(x,y)$. 用全息图强度分布减去直透光的强度分布,并进行滤波处理^[6];目的是为了减少直透光波和噪声对再现像的影响. 本文第4部分的实验数据处理中仅使用了减去直透光强度的方法.

第二步,用预处理后的全息图 $I'_H(x,y)$ 和实际系统中估测的颗粒场中心到 CCD 的距离 z_0 ,由式(7)再现得到 $(2N+1)$ 个不同层面上的颗粒强度分布 $a_R(x,y; z_0 + n\Delta z)$, 并求和取平均得到

$$\bar{a}_R(x,y) = \frac{1}{(2N+1)} \sum_{n=-N}^N a_R(x,y; z_0 + n\Delta z) \quad (11)$$

式中: $n = 0, \pm 1, \dots, \pm N$, Δz 是每次再现时再现距离改变的步长, $2N\Delta z$ 近似为颗粒场纵向厚度, Δz 的取值与颗粒密度相关,可取同轴数字全息在记录参数下的纵向分辨.

第三步,对第二步得到的平均颗粒强度分布进行二值化处理,得到二值化平均颗粒强度分布

$$\overline{a_{R,B}}(x,y) = B\{\overline{a_R}(x,y) - (\overline{a_R}(x,y))\} \quad (12)$$

式中, $B\{\cdot\}$ 是二值化算符;下标中的 B 表示二值化;用对所有像素的平均值 $(\overline{a_R}(x,y))$ 作为阈值。

第四步,标记每个颗粒的横向位置和占据区域。第三步得到的二值化平均颗粒强度分布 $\overline{a_{R,B}}(x,y)$ 中包含了不同层面上的所有颗粒的横向位置和占据区域的信息,它是一个二值化的二维数组。对 $\overline{a_{R,B}}(x,y)$ 进行逐行扫描,标记每个颗粒横向的位置和占据区域。

第五步,颗粒独立聚焦判别。对颗粒场中的每个颗粒,根据第四步所标记的横向位置和占据区域,利用第二步中得到的在不同层面再现的颗粒强度分布 $a_R(x,y;z_0+n\Delta z)$,用式(9)或(10)进行聚焦判断,得到每个颗粒聚焦成像的 z 值。若在第二步中选取的再现距离步长 Δz 比较大,对某些颗粒得到的聚焦距离可能不是最佳聚焦距离、只是一个近似值;为了进一步得到更精确的聚焦距离,对颗粒场中的每个颗粒可以在其聚焦距离近似值附近取更小的再现距离步长,再重复从第二步到第五步的过程。

各步中第一步是全息图的预处理,第二到第四步是颗粒分割识别,第五步是颗粒独立聚焦。整个过程可以用图 2 所示的框图来表示。由于第三步中的式(11)是沿纵向(z 轴方向)对所有不同层面上的再现像强度分布取平均,第三步式(12)中的 $(\overline{a_R}(x,y))$ 是沿横向(在 xy 平面)对所有像素取平均并作为二值化的阈值,该阈值与聚焦颗粒的强度值相比较小,并且对每一个颗粒来说不同层面上的

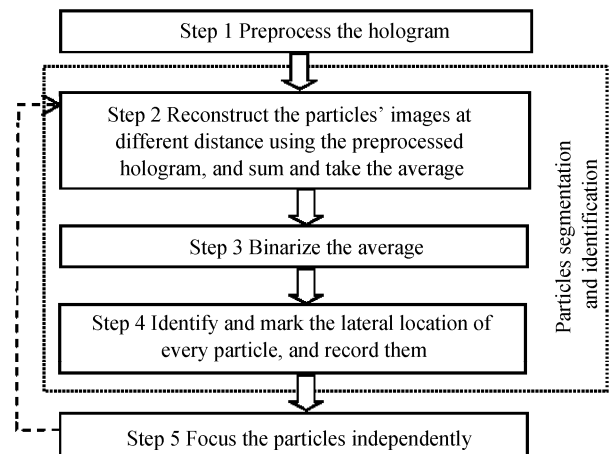


图 2 颗粒分割识别与独立聚焦实现框图

Fig. 2 Schematic block diagram for particle segmentation identification and independent Focus

再现像的聚焦程度(清晰程度和弥散程度)尽管不同,但中心位置是相同的,因此,从第二步到第四步得到的每个颗粒的横向位置和占据区域均包含了相应颗粒的真实横向位置和占据区域。每个颗粒更为精确的横向位置和纵向聚焦位置可以通过第五步的颗粒独立聚焦判别以及不断缩小 Δz 来逐渐逼近。

4 实验验证结果

颗粒分割识别与独立聚焦方法可以精确判断单层或多层颗粒的聚焦位置。实验中采用的颗粒是切割的微小头发丝,长度约为 $100\sim 400\ \mu\text{m}$,直径约为 $70\ \mu\text{m}$ 。其它实验参数:激光波长为 $0.532\ \mu\text{m}$,CCD 像元大小为 $9\ \mu\text{m}$,靶面大小为 1024×1024 。

4.1 单层单个颗粒

首先用单层单个颗粒的情况来验证第三部分式(9)和(10)给出的聚焦判据。在洁净的载玻片上放置一个头发颗粒来模拟单层单个颗粒,全息记录时物面到 CCD 靶面的记录距离估测值 z_0 为 $152\ \text{mm}$,图 3 是记录的全息图。再现距离 z_R 从 $149\ \text{mm}$ 增加至 $156\ \text{mm}$,再现距离步长为 $1\ \text{mm}$,即每隔 $1\ \text{mm}$ 再现一个面。图 4(a)和(b)是总强度值 V_I 和强度起伏均方差值 V_V 随着再现距离的变化。从图中数据可以看出,在第 5 个再现像面处 V_I 最大、 V_V 最小,可见该颗粒在第 5 个再现像面即在 $153\ \text{mm}$ 附近聚焦。再在 $152.2\sim 153.6\ \text{mm}$ 每间隔 $0.2\ \text{mm}$ 再现 8 个像面,得到的总强度值 V_I 和强度起伏均方差值 V_V 随着再现距离的变化如图 4(c)和(d)。从图 4(c)和(d)可知该颗粒聚焦位置为 $152.8\ \text{mm}$,在 $152.8\ \text{mm}$ 处再现的该颗粒像如图 5(a)。图 5(b)是图 5(a)中的颗粒像的局部放大。若要得到更精确的聚焦位置,还可以以 $152.8\ \text{mm}$ 为中心、取更小的步长间隔 Δz ; Δz 的最小值受纵向分辨率的限制。

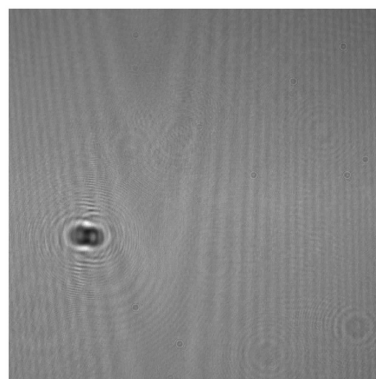


图 3 单层单个颗粒全息图

Fig. 3 The hologram for one layer of one particle

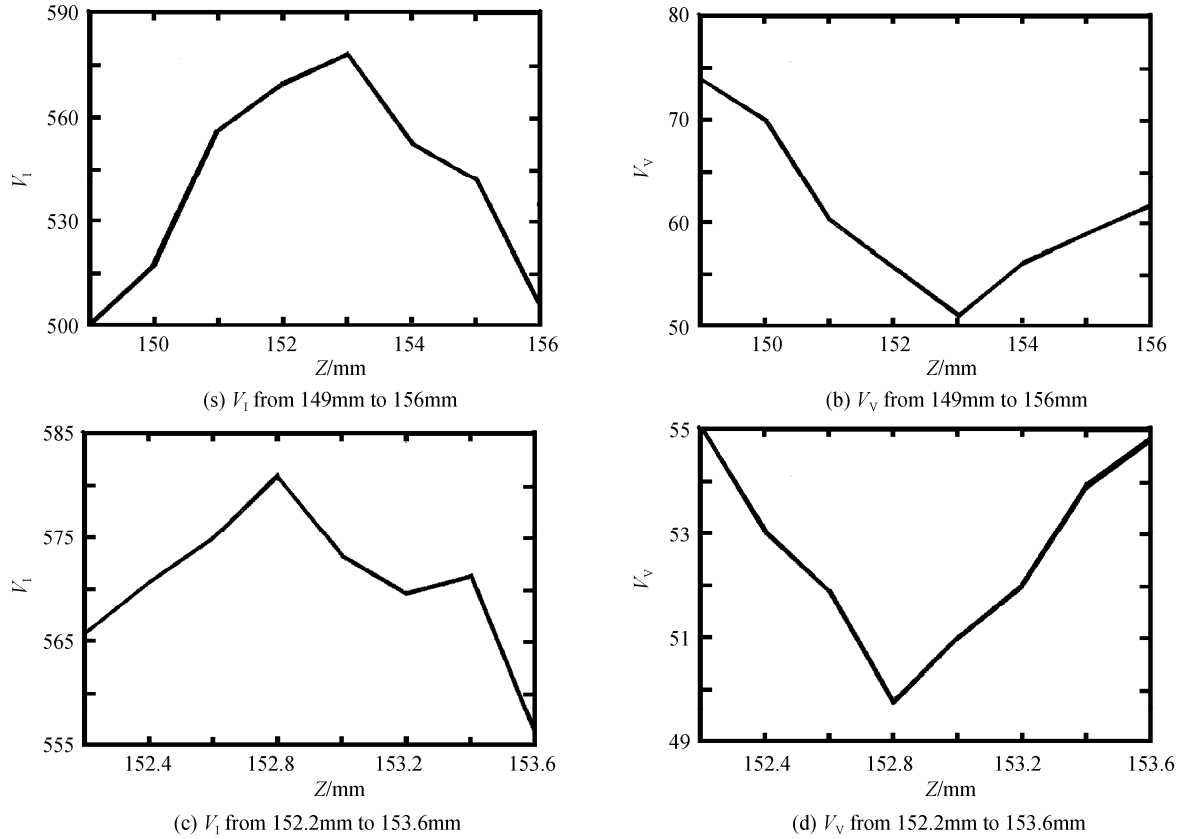


图4 单层单个颗粒不同位置再现的总强度值 V_I 和光强起伏均方差值 V_V

Fig. 4 V_r and V_v of reconstructed image at different positions for one layer of one particle

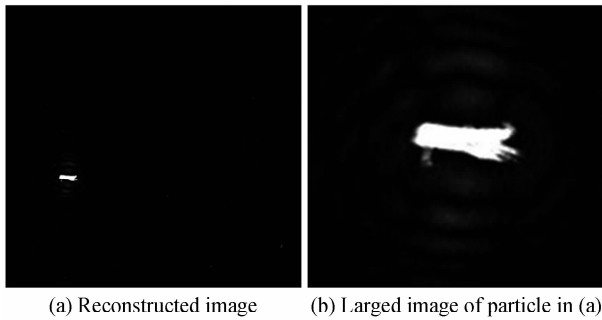


图5 单层单个颗粒再现像

Fig. 5 Reconstructed images for one layer of one particle

4.2 两层两个颗粒

将两个头发丝颗粒分别放在洁净载玻片的前后两个表面来模拟两层两个颗粒的情况,载玻片厚度约为 0.3 mm,全息记录时物面到 CCD 靶面的记录距离估测值 z_0 为 155 mm. 图 6 是记录的全息图. 在 151 mm 至 160 mm 之间每隔 1 mm 再现,得到 10 个不同层面上的再现像,求和、取平均并二值化. 对得到的均值二值化图像通过 0、1 初步判断两颗粒轮廓,并进行编号.

针对两颗粒轮廓内所包含区域,再现距离 z_R 以 1 mm 间距从 151 mm 增加至 160 mm,即每隔 1 mm 再现一个像面. 图 7(a)是两颗粒轮廓区域内强度起伏均方差值 V_V 随着再现距离的变化. 从图 7(a)可

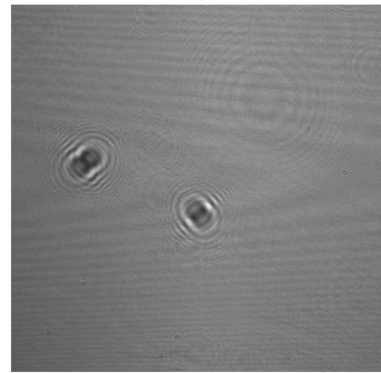


图6 两层两个颗粒的全息图

Fig. 6 The hologram for two layers of two particles

知,分别位于载玻片前后两面的两个颗粒的初步聚焦位置均都在第 5 个面附近,即再现距离 155 mm 附近. 这是因为载玻片的厚度只有 0.3 mm 左右,选取的再现距离步长 1 mm 太大了. 再在 154.6 mm 至 155.5 mm 之间每隔 0.1 mm 再现 10 个像面,得到的两颗粒轮廓内强度起伏均方差值 V_V 随着再现距离的变化波动值如图 7(b). 从图 7(b)可以看出,颗粒 1 聚焦在第 3 个面、再现距离为 154.8 mm 处,颗粒 2 聚焦在第 8 个面、再现距离为 155.3 mm 处. 二者聚焦面之间的距离为 0.5 mm,考虑到载玻片的折射率及步长 0.1 mm 还不够精细等因素,该值是较为合理的.

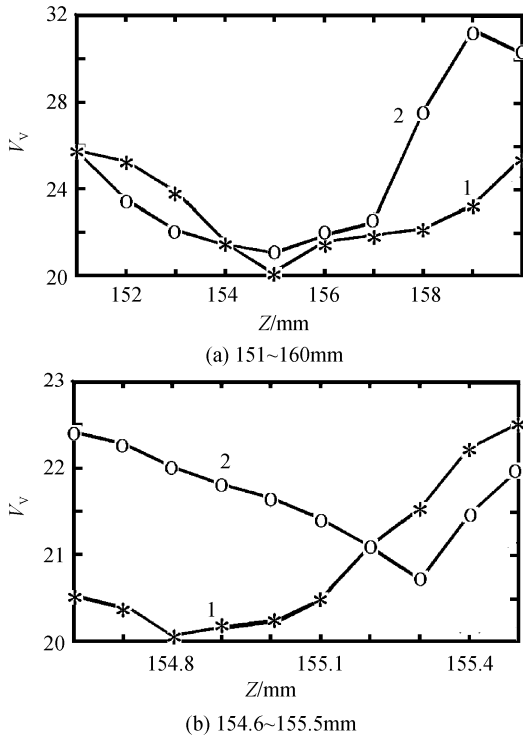


图7 在不同位置再现时的光强起伏均方差值 V_v
 Fig. 7 The V_v of reconstructed images at different positions for two layers of two particles

在图8所示的实验结果中,(a)~(c)对应的再现距离是154.8 mm,(d)~(f)对应的再现距离是155.3 mm.比较图(b)和(c)可以清楚地看到,在154.8 mm的再现距离上颗粒1成像清晰,而颗粒2成像不清晰;比较图(e)和(f)可以清楚地看到,在155.3 mm的再现距离上颗粒1成像不清晰,而颗粒2成像清晰.同样的,比较图(b)和(e)及图(c)和

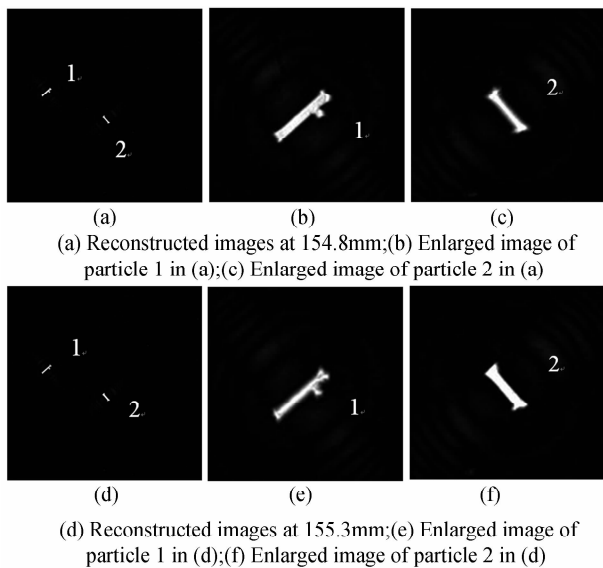


图8 两层两个颗粒在不同位置的再现像
 Fig. 8 The reconstructed images at different positions for two layers of two particles

(f)可以得出同样的结论.

4.3 多层多个颗粒

考虑到液体光透过率和头发颗粒悬浮条件,在比色皿中加入粘度较大的液体石蜡,将多个头发丝颗粒放入液体石蜡中模拟多层多个颗粒的情况.比色皿大小为 $10 \times 30 \times 5 \text{ mm}^3$,轴向透光方向的厚度为5 mm.全息记录时物面(比色皿中心所在平面)到CCD靶面的记录距离估测值 z_0 为151 mm.图9(a)是记录的全息图.在148 mm至155 mm之间每隔1 mm再现,得到8个不同层面上的再现像,求和、取平均并二值化,得到的均值二值化图像如图9(b).

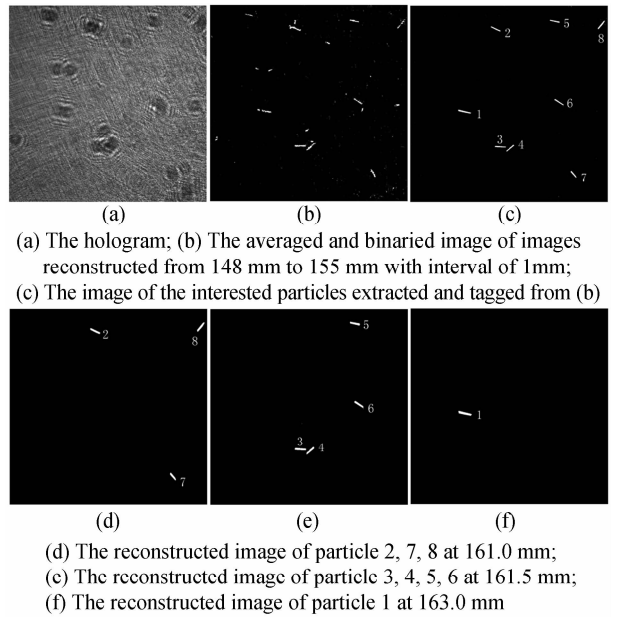


图9 多层多个颗粒的实验结果
 Fig. 9 The experimental results for multi-layers of multi-particles

在对均值二值化图像进行颗粒分割识别过程中,可提取感兴趣的一定尺寸范围内的颗粒并进行标记编号.图9(c)是根据图9(b)进行颗粒分割识别和标记的结果.图10(a)~(h)分别是1至8号标记颗粒在159.5~163.0 mm每隔0.5 mm再现时的总光强值随再现距离的变化,根据图10,颗粒2、7和8的聚焦位置是161.0 mm,颗粒3、4、5和6的聚焦位置是161.5 mm,颗粒1的聚焦位置是163.0 mm,对于颗粒1还可以以163 mm为中心寻找更好的聚焦位置.图9(d)是在161.0 mm处再现的颗粒2、7和8的图像,图9(e)是在161.5 mm处再现的颗粒3、4、5和6的图像,图9(f)是在163.0 mm处再现的颗粒1的图像.针对某一颗粒可继续缩小再现距离的步长,查找更为精确的聚焦位置,限于篇幅,这里就不再计算了.

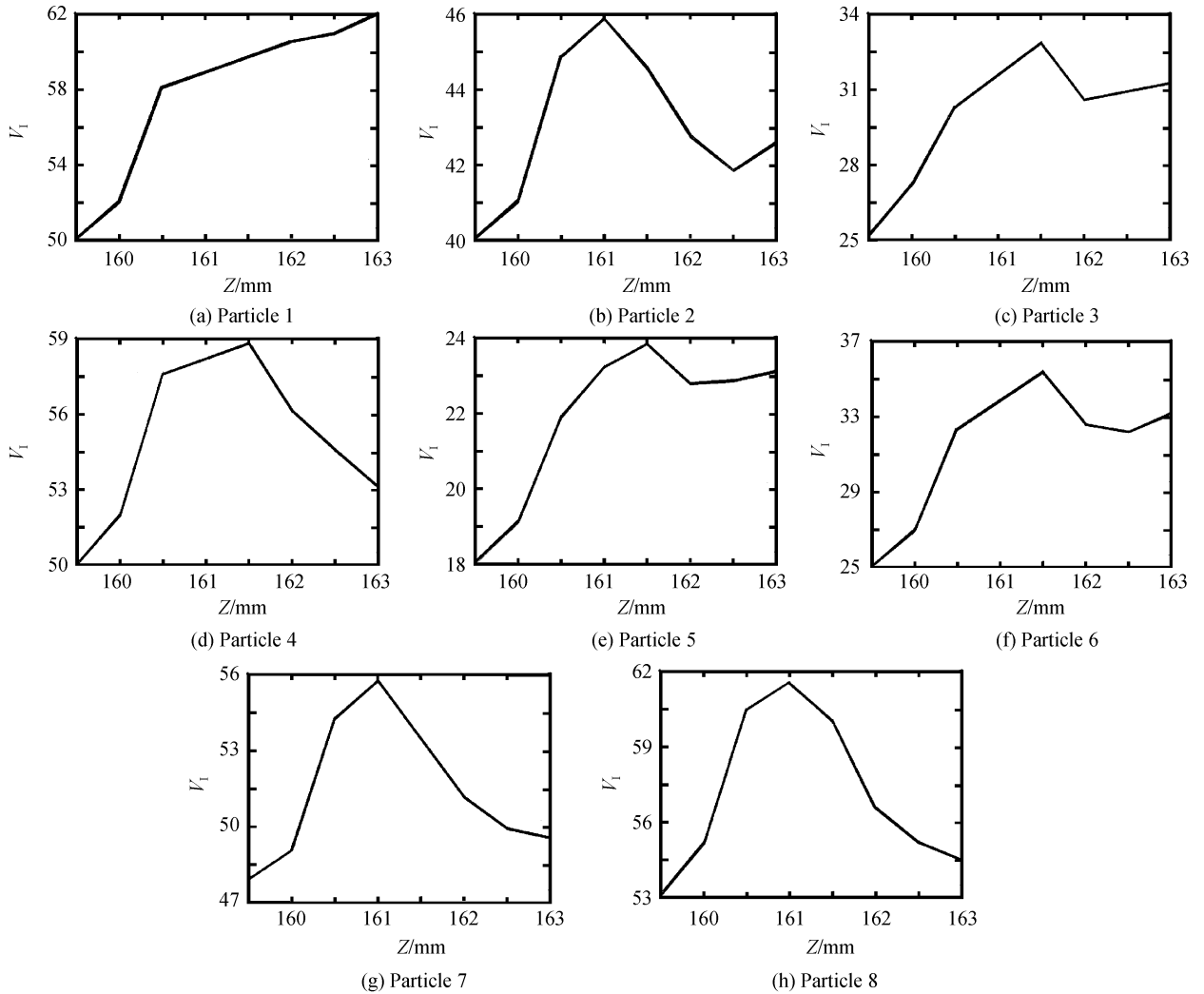


图 10 1 至 8 号颗粒在 159.5 mm 至 163.0 mm 之间每隔 0.5 mm 再现时的 V_1
 Fig. 10 The V_1 of particle 1 to particle 8 when reconstructed from 159.5 mm to 163.0 mm

5 结论

数字同轴全息与数字图像处理技术相结合,在微观颗粒场检测方面优势明显,日益得到广泛重视.本文基于对颗粒场数字同轴全息记录与再现原理的讨论,考虑到在大多数的颗粒场检测应用中颗粒场中的颗粒都是不透明的,给出了单个颗粒聚焦判别的聚焦判别函数;针对数字同轴全息颗粒场检测中不同层面颗粒的自动聚焦问题,提出了一种颗粒场颗粒分割识别与独立聚焦的方法.通过对记录的全息图在估测距离上间隔再现成像,初步判断颗粒轮廓并进行标记编号,分层独立计算各颗粒聚焦函数,根据峰值,由粗到细寻找颗粒聚焦位置,最后确定各颗粒精确聚焦位置.对模拟的单层单个、两层两个及多层多个颗粒的颗粒场情况进行了实验研究,实验结果证明了所采用的聚焦判别函数及颗粒分割识别与独立聚焦方法是可行的.本文所研究的方法可用于数字同轴全息颗粒场检测中的颗粒自动聚焦成像,并可为后续的颗粒分类统计提供很大方便.

参考文献

- [1] GABOR D. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, **151** (4098): 777-778.
- [2] GARCIA-SUCERQUIA J, XU W, JERICHO S K, *et al.* Digital in-line holographic microscopy[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**: 836-850.
- [3] XU W, JERICHO M H, MEINERTZHAGEN I A, *et al.* Digital in-line holography of microspheres[J]. *Appl Opt*, 2002, **41**: 5367-5375.
- [4] LIU Cheng, LI Yin-zhu, CHING Xiao-tian, *et al.* Elimination of zero-order diffraction in digital holography[J]. *Opt Eng*, 2002, **41**(10): 2434-2437.
- [5] DENIS L, CORINNE F. Twin-image noise reduction by phase retrieval in in-line digital holography[C]. *SPIE*, 2005, **5914**: 148-162.
- [6] KIM S, LEE S J. Effect of particle number density in in-line digital holographic particle velocimetry[J]. *Exp Fluids*, 2008, **44**(4): 623-631.
- [7] ZHANG Yan-cao, ZHAO Jian-lin, ZHANG Wei, *et al.* Digital hologram apodization using tukey window function[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2256-2259.
张延曹, 赵建林, 张伟, 等. Tukey 窗函数用于数字全息图的切趾研究. *光子学报*, 2007, **36**(12): 2256-2259.
- [8] XU Wen-bo, JERICHO M H. Digital in-line holography for biological applications[J]. *PNAS*, 2001, **98**(20): 11301-11305.
- [9] HEYDT M, ROSENHAHN A, GRUNZE M. Digital in-line

- holography as a three-dimensional tool to study motile marine organisms during their exploration of surfaces[J]. *The Journal of Adhesion*, 2007, **83**:417-430.
- [10] 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.
- [11] PALERO V, AMOYO M P, SORIA J. Digital holography for micro-droplet diagnostics[J]. *Exp Fluids*, 2007, **43**(2):185-192.
- [12] PU Shi-liang, DENIS L, WANG Qin. Application of digital holography to CFB measurement [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, **25**(15):114-118.
浦世亮, DENIS L, 王勤. 激光数码全息测量技术在循环流化床中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2005, **25**(15):114-118.
- [13] PU S L, ALLANO D, PATTE-ROULAND B, *et al.* Particle field characterization by digital in-line holography: 3D location and sizing[J]. *Experiments in Fluids*, 2005, **39**(1):1-9.
- [14] GILLESPIE J, KING R A. The use of self-entropy as a focus measure in digital holography[J]. *Pattern Recognition Lett*, 1989, **9**:19-25.
- [15] DUBOIS F, SCHOOCKAERT C, CALLENS N, *et al.* Focus plane detection criteria in digital holography microscopy by amplitude analysis[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(13):5895-5908.
- [16] LIEBLING M, UNSER M. Autofocus for digital fresnel Holograms by use of a fresnel-sparsity criterion[J]. *JOSA A*, 2004, **21**:2424-2430.
- [17] FERRARO P, COPPOLA G, NICOLA S D, *et al.* Digital holographic microscope with automatic focus tracking by detecting sample displacement in real time[J]. *Opt Lett*, 2003, **28**:1257-1259.
- [18] YU L, CAI L. Iterative algorithm with a constraint condition for numerical reconstruction of a three dimensional object from its hologram[J]. *JOSA*, 2001, **18**:1033-1045.
- [19] YAND Y, KANG B S, CHOO Y. Application of the correlation coefficient method for determination of the focal plane to digital particle holography[J]. *Appl Opt*, 2008, **47**(6):817-823.
- [20] SOULEZ F, DENIS L, FOUMIER C, *et al.* Inverse-problem approach for particle digital holography: accurate location based on local optimization[J]. *JOSA A*, 2007, **24**(4):1164-1171.
- [21] PU S L, ALLANO D, ROULAND B P. Particle field characterization by digital in-line holography: 3D location and sizing[J]. *Exp Fluids*, 2005, **39**(1):1-9.
- [22] CHOO Y G, KANG B S. The characteristics of the particle position along an optical axis in particle holography[J]. *Meas Sci Technol*, 2006, **17**(8):761-769.
- [23] WEICHANG Li, NICK C L, QIAO H, *et al.* Focus detection from digital in-line holograms based on spectral l_1 Norms[J]. *JOSA A*, 2007, **24**(10):3054-3062.
- [24] MARK L T, MASAHIDE I, TOYOHICO Y. Simultaneous depth determination of multiple objects by focus analysis in digital holography[J]. *Appl Opt*, 2008, **47**(19):144-153.
- [25] LUO Zheng-xiong, LI Ze-ren, LI Zuo-you, *et al.* An automatic segmenting method for the reconstructed image of high speed particle field. [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3):503-506.
罗振雄, 李泽仁, 李作友, 等. 高速粒子场的全息再现图像的自动分割方法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(3):503-506.

Segmentation Identification and Independent Focus for Digital In-Line Holography of Particle Fields

XU Yuan-qiang^{1,2}, WANG Yu-rong¹, DING Hai-sheng¹

(1 School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

(2 72690PLA, Taian, Shandong 271000, China)

Abstract: A new autofocusing method for particles located in different plane in particle field detection with digital in-line holography is proposed and experimentally verified by analyzing the characters of recording and reconstructing about digital in line holography. The focus measure function and the operation procedure of particle segmentation identification and independent focusing are presented. The proposed method is verified through the experiments of one layer of one particle, two layers of two particles and multi-layers of multi-particles.

Key words: Digital in-line holography; Particles field detection; Focus measure function; Particles segmentation and identification; Independent focusing



XU Yuan-qiang was born in 1979. He received the B. S. degree from Ocean University of China. Now he works at 72690 PLA and he is a graduate student at Shandong University. His main research interests focus on digital in-line holography.



WANG Yu-rong was born in 1965. He got his Ph. D. degree in optical engineering. Now, he works as a professor, and his current research interests focus on digital holography, optical image encryption and information security, optical interferometry and laser display.