

# 线性加权物体振幅和相位的数字全息焦平面定位研究

杨 鸿<sup>1</sup> 陈鹤鹏<sup>2</sup> 刘 海<sup>1</sup> 李 扬<sup>1</sup> 徐国庆<sup>1</sup> 杨 岩<sup>1</sup>

<sup>1</sup>重庆理工大学 机械工程学院, 重庆 400054

<sup>2</sup>韩国全南大学 机械工程学院, 韩国 光州 500-757

**摘要** 将物体波前中的振幅信息与相位信息同时作为焦平面判定准则, 物体波前中含有振幅信息和相位信息, 而强度是振幅的表现形式, 较容易获得, 因此目前主要提取物体波前的振幅信息来定位焦平面。采用相关系数(CC)法提出并验证了利用物体的振幅信息判定焦平面。分析相位信息将运用于相关系数法中, 获得CC曲线峰值确定焦平面距离。分析得到同一物体的振幅CC曲线和相位CC曲线峰值所确定的焦平面距离有差距的原因是因为物体波前振幅和相位信息的区别。运用线性加权法, 将物体的振幅CC曲线和相位CC曲线峰值所确定的焦平面距离加权来确定物体的焦平面。运用一系列实验验证了该焦平面方法的可行性和有效性。

**关键词** 全息; 数字全息; 焦平面; 线性加权; 相位

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.010901

## Focal Plane Determination Based on Linear Weighting of Amplitude and Phase in Digital Holography

Yang Hong<sup>1</sup> Chen Hepeng<sup>2</sup> Liu Hai<sup>1</sup> Li Yang<sup>1</sup> Xu Guoqing<sup>1</sup> Yang Yan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

**Abstract** A new refocusing criterion taking advantage of both intensity and phase information of object wave front is applied to detect a focal plane. The wavefront of object includes amplitude and phase information and amplitude information is mainly employed to locate the focal plane on account of intensity of holograms is on behalf of amplitude and easy to obtain. The study of the correlation coefficient (CC) method on intensity has been proved. Phase information is analyzed and employed in CC method and focusing distance obtained from the peak of CC curve. The difference between the two focal distance obtained by phase information and amplitude information is due to that there is a difference on amplitude and phase of wave front. The two distance obtained from CC curve of amplitude and phase is weighted based on linear weighting and a final focal plane is positioned. Experiments validate that it works effectively.

**Key words** holography; digital holography; focal plane; linear weighting; phase

**OCIS codes** 090.1995; 350.5730; 350.5030

## 1 引 言

数字全息具有实时性、非破坏性、观测周期长、反应速度快等优点而被广泛地应用于许多领域。数字全息的一个最主要的优点是可以利用菲涅耳-基尔霍夫衍射理论来数字重建物体波前<sup>[1]</sup>, 而数字重建能帮助检测焦平面。目前, 振幅信息在全息图的焦平面数字分析中广泛运用<sup>[2-3]</sup>。传统的典型焦平面定位方法是沿着物光光波传播方向对全息图进行强度分析。沿着光轴重建出一系列的重建图像, 重建像锐利度最高的即为焦平面处的重建像。通常使用的锐利度指标有: 熵<sup>[4]</sup>, 方差<sup>[5]</sup>, 频谱<sup>[6]</sup>以及使用相关系数法来判断焦平面<sup>[7]</sup>。

相位分布图在细胞研究等很多领域中被广泛使用, 即使在阶跃高度差大于半个波长的情况下会发生相

收稿日期: 2015-05-29; 收到修改稿日期: 2015-07-16; 网络出版日期: 2015-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(11272368)

作者简介: 杨 鸿(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事数字全息方面的研究。E-mail: jiang\_mu@163.com

导师简介: 杨 岩(1975—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事数字全息方面的研究。

E-mail: yangyan@cqut.edu.cn (通信联系人)

位缠绕现象。相位分布与物体的强度分布是物体波前两个方面的表现,都能反映出物体的特征。当目标物体偏向于纯相位物体时,其相位信息独立于强度信息,且物体的相位分布较强度分布更能反映出物体特征,无法利用振幅信息来判断焦平面的位置,在此种情况下则需要分析物体的相位分布,通过对相位分布的分析来确定焦平面。Colomb等<sup>[8-9]</sup>尝试了将相位运用于判定焦平面。由于光传播特性,在实际情况中,物体相位可能会缠绕在 $2\pi$ 中,使缠绕的相位不适合被用于判断焦平面,但是相位的解包裹算法已经能将相位从 $2\pi$ 中恢复出来,得到物体的原相位。考虑到在细胞观测等应用中,相位信息较振幅信息影响显著,而且物体的波前信息中同时包含振幅信息和相位信息。因此,有必要在考虑振幅信息的同时结合相位信息作为焦平面判定准则,提高对生物细胞<sup>[10-11]</sup>,颗粒场<sup>[12]</sup>等领域的观测检验精度,具有现实的应用意义。

本文简要介绍数字全息记录及重建等基本理论。为获得清晰的重建像,简要分析了相关系数法的基本原理,以此来定位焦平面所在位置。理论分析了将相位信息运用于相关系数法来判定焦平面,利用具有不同尺寸圆点的标准靶面以及数字全息实验系统验证了该理论并与传统的利用振幅信息的相关系数法进行对比分析。由物体振幅和相位按照相关系数法的基本原理所得公式确定的焦平面距离差异较小,按照50%-50%的线性加权权重计算振幅和相位得出的焦平面距离,定位焦平面。对振幅、相位以及加权所得重建像以及放大像进行对比分析,加权所得重建像以及放大像在靶面上尺寸为70、65、60、55  $\mu\text{m}$ 等尺寸大于等于31  $\mu\text{m}$ 区域的粒子图像质量优于振幅和相位所得重建像,锐利度提高。

## 2 原 理

### 2.1 数字全息基本原理

数字全息将全息图记录于光电耦合器[CCD(CMOS)],利用波前的数字传播重建出三维物体重建像。通常,数字全息可分为同轴数字全息和离轴数字全息系统。同轴数字全息因光路简单等优点被广泛用于观测系统中,其简图如图1所示。在该光学系统中,经过物体衍射的光束称为物光,参考光即为没有和物体发生相关作用的光束,参考光和物光发生干涉形成全息图。在重建过程中使用的菲涅耳-基尔霍夫衍射积分原理如(1)式所示。

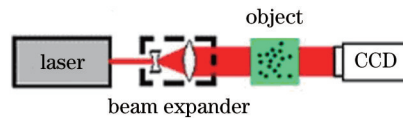


图1 同轴数字全息系统

Fig.1 Optical set-up of in-line digital holography

$$R(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R(x, y) \frac{\exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(\xi' - x)^2 + (\eta' - y)^2 + d^2}\right]}{\sqrt{(\xi' - x)^2 + (\eta' - y)^2 + d^2}} dx dy. \quad (1)$$

图2解释了(1)式中的坐标轴系。 $R(\xi', \eta')$ 为重建像的波前,  $E_R(x, y)$ 为参考光波前,  $h(x, y)$ 为全息方程,  $\lambda$ 是波长而两个平面间的距离用 $d$ 来表示。在重建面上和全息面上两点间的距离即为 $\sqrt{(\xi' - x)^2 + (\eta' - y)^2 + d^2}$ 。

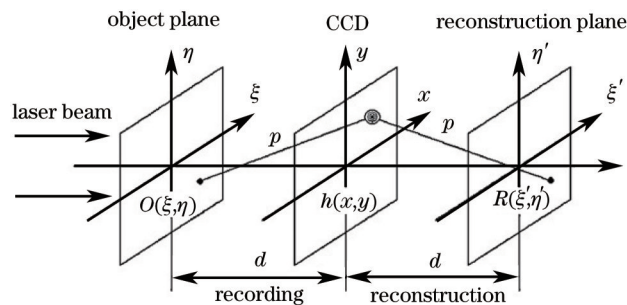


图2 数字全息记录 and 重建的坐标轴变换系统

Fig.2 Coordinate system of digital holography recoding and reconstruction

## 2.2 相关系数法的基本原理

Yang等<sup>[13]</sup>研究得出在物体焦平面左右对称的两侧等距离强度重建像相同。以某一平面为分析对象,测量以该平面为中心,沿着光轴重建出两个平面强度图像的相似程度来确定焦平面位置。在相关系数(CC)值为1代表两平面图像完全相似,则中心平面所对应的横坐标距离即为焦平面重建距离,当CC值为0时则两平面没有相似性,则该中心平面不是焦平面,无法确定焦平面的距离,继续沿着光轴分析计算下一个平面。CC计算原理如(2)式所示,图3用图解的方式描述了基于强度的CC方法来判定焦平面的过程。以 $\Delta z$ 为重建间距, $\Delta C_z/2$ 为左右对称平面与中心平面的距离,沿着光轴切片地重建出物体的强度重建像,利用CC计算公式,判断光轴上重建像对称两侧图像的相关度,以此定位出焦平面。

$$f_{CCA} = \frac{\sum_m \sum_n (F_{mn} - \overline{F_{mn}})(G_{mn} - \overline{G_{mn}})}{\sqrt{\left[ \sum_m \sum_n (F_{mn} - \overline{F_{mn}})^2 \right] \left[ \sum_m \sum_n (G_{mn} - \overline{G_{mn}})^2 \right]}}, \quad (2)$$

式中 $m, n$ 为像素点, $F$ 和 $G$ 为被分析的两张图像, $\overline{F_{mn}}$ 和 $\overline{G_{mn}}$ 为其对应的平均灰度图像。

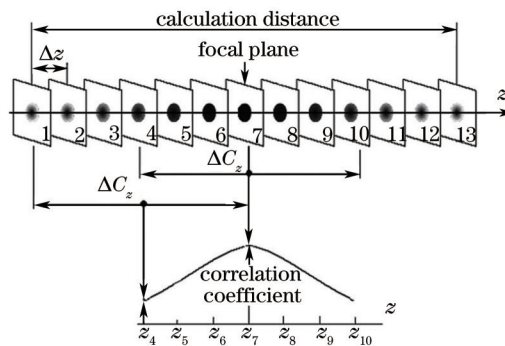


图3 相关系数法

Fig.3 CC method

## 2.3 基于振幅和相位的焦平面定位方法

在已搭建的光学测试平台中,通过测量手段可粗略测得物体和CCD间的距离。但是由于光学系统及被观测物体的动态特性无法准确测得实时光学系统中物体和CCD间的距离。在观测系统中,物体的热物理性质等各种外界因素可能会导致物体表面发生变形或产生位移<sup>[14]</sup>。显然,没有在焦平面上的重建像因为信息丢失而图像模糊,而在不考虑系统误差时,焦平面上的物体几乎没有丢失信息,物体重建像清晰。因此,利用数字全息数字重建原理来准确地定位焦平面以提高观测精度具有重要的意义。在重建物体波前的数字分析过程中,数字化判定焦平面的定焦方法已经取得了研究成果。在判定焦平面准则中,主要的方法是进行振幅分析<sup>[15-17]</sup>,而少量研究者将相位作为物体的焦平面判定法则<sup>[9]</sup>。物体波前包含有物体的振幅和相位两个方面的信息,振幅或相位信息只是物体波前的某个方面,为了准确定位焦平面提高图像清晰度和观测精度,将物体的振幅和相位信息相结合作为判定焦平面的准则。

对物体进行强度分析后,利用CC定焦原理可得出一条CC曲线,该曲线对称分布,最高点对应的横坐标表示的距离即为焦平面的所在位置。将相位分析运用于相关系数法中来定位焦平面的主要问题在于物体相位发生缠绕。当物体波前波长大于激光波长时,物体波前相位信息会被包裹在 $2\pi$ 中,即范围在 $[-\pi, \pi]$ 的区间范围。随着相位解包裹算法的研究和发展,可恢复缠绕的相位信息。经过理论分析,将得到的相位信息再运用于相关系数法中来作为定位焦平面的判定准则,则能得到物体的焦平面所在位置。理论分析和实验验证发现,相位信息在相关系数法中的应用过程中,焦平面两侧对应的图像相似度很高或相同,计算得出的CC曲线呈对称分布且最高点则为所求重建距离。相位的CC计算可用(3)式来表述:

$$f_{CCP} = \frac{\sum_m \sum_n (H_{mn} - \overline{H_{mn}})(P_{mn} - \overline{P_{mn}})}{\sqrt{\left[ \sum_m \sum_n (H_{mn} - \overline{H_{mn}})^2 \right] \left[ \sum_m \sum_n (P_{mn} - \overline{P_{mn}})^2 \right]}}, \quad (3)$$

式中 $m, n$ 为像素点数, $H, P$ 为左右对称两侧相位分布图, $\overline{H_{mn}}$ 和 $\overline{P_{mn}}$ 则为对应的平均相位分布图。

本验证实验中,所用激光波长为 532 nm, CCD 分辨率为 2048 pixel×2048 pixel, 像元大小为 7.4 μm×7.4 μm。本实验的目的在于验证利用相位信息作为判定焦平面准则的可行性,因此选用标准靶面来作为目标物体,在确认焦平面过程中,不需要对相位信息进行解包裹处理。图 4 展示了利用相位信息判定焦平面的 CC 曲线,同时获得同一目标物体的振幅 CC 曲线,将两曲线进行了对比分析得出,振幅 CC 曲线峰值在 249.45 mm 处,而相位 CC 曲线峰值在 249.55 mm 处。目标物体的全息图以及对应的振幅和相位峰值确定的焦平面距离处重建图像如图 5 所示。

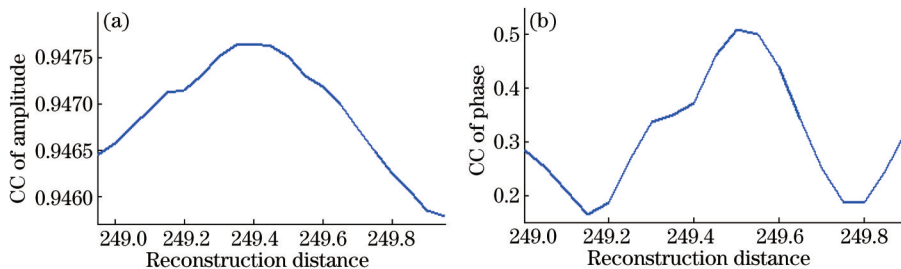


图 4 (a) 振幅的 CC 曲线; (b) 相位的 CC 曲线

Fig.4 (a) CC method by amplitude; (b) CC method by phase

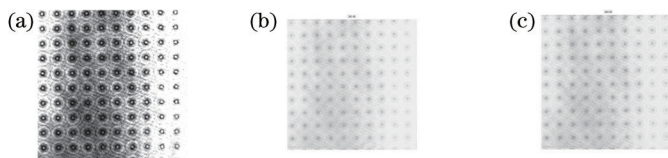


图 5 (a) 全息图; (b) 振幅 CC 曲线峰值重建图; (c) 相位 CC 曲线峰值重建图

Fig.5 (a) Hologram; (b), (c)reconstruction image of amplitude distribution and phase distribution respectively

该实验验证了用相位 CC 曲线来定位焦平面。如图 4 中所示,在利用物体的相位分布获得的 CC 曲线中,根据该曲线的峰值来定位焦平面距离。该曲线峰值处对应的横坐标 249.55 mm 即为焦平面所在距离。在图 4 中,将目标物体的振幅 CC 曲线与相位 CC 曲线作了对比分析。振幅 CC 曲线的峰值在 249.45 mm 处,且由于物体波前的两个参数振幅和相位存在差异,因此由相位和振幅得出的 CC 曲线峰值不相同,横坐标对应的重建距离也不相同。通过实验验证将振幅和相位运用于相关系数法的可行性。因此,利用相关系数法,将物体振幅和相位信息同时作为判定焦平面的准则。在分析得出振幅和相位的 CC 曲线峰值后,运用加权系数将振幅确定的焦距和相位确定的焦距加权后得到最后的焦平面距离。由物体振幅和相位按照相关系数法的基本原理所得公式确定的焦平面距离差异较小,初步探讨后,按照 50%-50%的线性加权权重计算振幅和相位得出的焦平面距离,定位焦平面:

$$d_{\text{focal}} = \frac{1}{2}d_{\text{CCA}} + \frac{1}{2}d_{\text{CCP}} \quad (4)$$

## 2.4 参数讨论

在参数确定和分析过程中,  $\Delta C_2/2$  确定为 10 mm, 将确定合适的重建间距  $\Delta Z$  作为重点讨论。本实验通过一系列实验,从实验中总结得出最佳的  $\Delta Z$  为 0.05 mm。用标准靶面做的一系列实验结果如图 6 所示。在实验系统波长为 632.8 nm, CCD 像素数为 2048 pixel×2048 pixel, 像元大小为 7.4 μm×7.4 μm。在另一种标准靶面的实验过程中,使用激光波长为 532.8 nm, 选用的 CCD 相同,得到的结果如图 7 所示。实验结果分析得出,  $\Delta Z$  为 0.05 mm 时,图像成对称趋势,但是由于光传播过程中的衍射现象使得图像并没有呈现出理论分析的绝对对称,因此实际曲线还存在不对称部分经过分析,在  $\Delta Z$  为 0.05 mm 时效果最好。

## 3 实验过程

选用粒子尺寸大小不一致的标准靶面,利用不同尺寸的粒子大小来比较分析由振幅、相位和同时由相位和振幅得到的焦平面的锐利度。该焦平面距离由振幅的 CC 曲线峰值、相位的 CC 曲线峰值以及由加权后得到的重建距离来确定。实验中的激光波长为 632.8 nm, CCD 分辨率为 2048 pixel×2048 pixel, 像元大小为 7.4 μm×7.4 μm。因此,该标准靶面在实际应用中不需要解包裹运算。图 8 中展示了振幅和相位的 CC 曲线,根据振幅的 CC 曲线峰值、相位的 CC 曲线峰值以及由加权后得到的重建距离得到的重建像如图 9 所

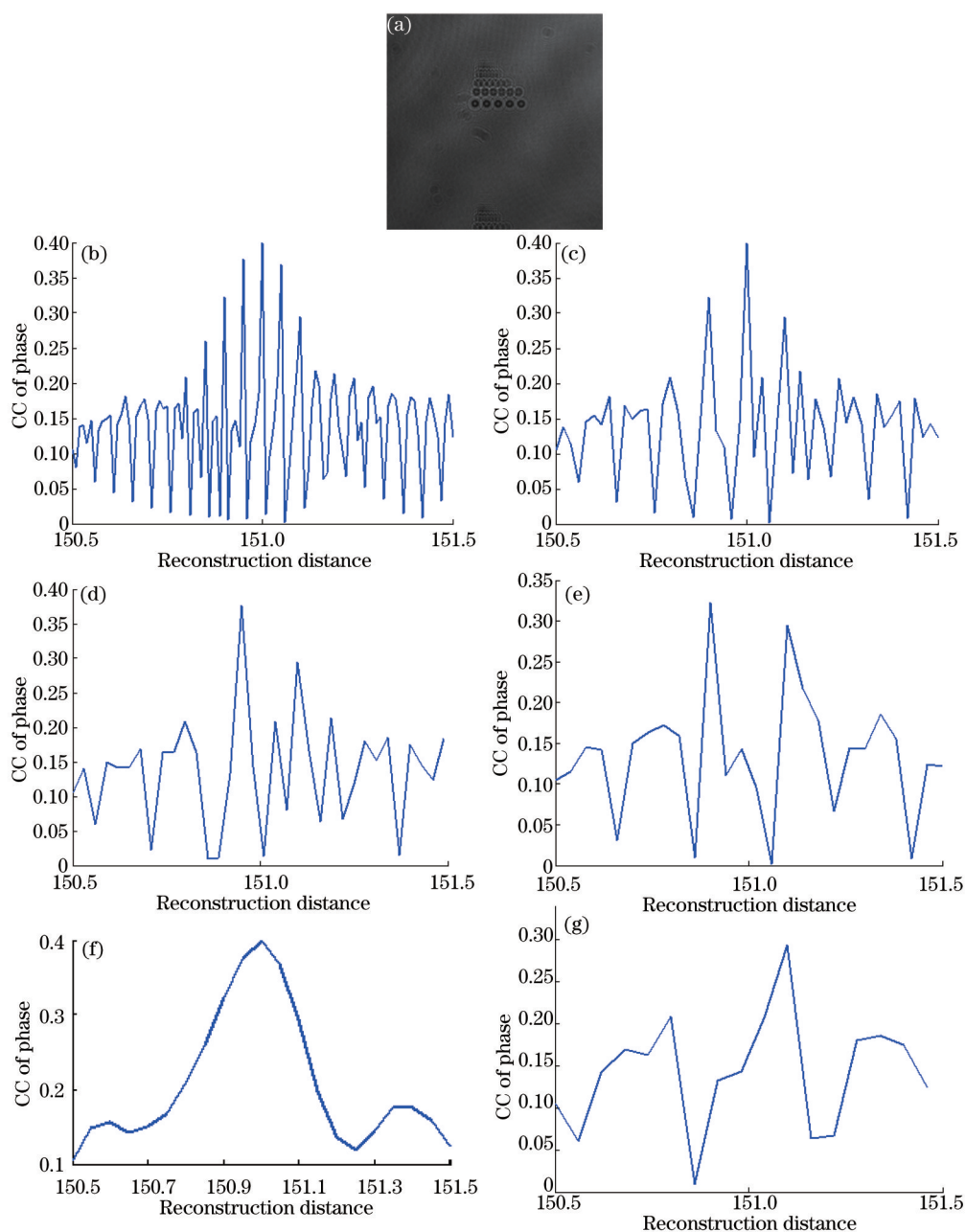


图6 (a)全息图( $\lambda=632.8$  nm); (b)~(g)相位的CC曲线,依次 $\Delta Z=0.01$  mm, 0.02 mm, 0.03 mm, 0.04 mm, 0.05 mm, 0.06 mm

Fig.6 (a) Hologram( $\lambda=632.8$  nm); (b)~(g) CC curve of phase information:  $\Delta Z=0.01$  mm, 0.02 mm, 0.03 mm, 0.04 mm, 0.05 mm, 0.06 mm respectively

示。对重建图像进行放大并选择感兴趣区域,进一步对比分析重建像的锐利度,比较三种方法所获得的结果。在实验中, $\Delta C_2$ 确定为10 mm, $\Delta Z$ 为0.05 mm。图9(b),(c),(d)图像都比较清晰,标准靶面上的粒子锐利度较高,因此将图像放大2倍后作进一步对比分析。在放大图图9(e),(f),(g)中,尺寸较大的粒子差异不明显,随着粒子尺寸减小,图像开始呈现明显差异。参照图10中的粒子尺寸,当粒子的尺寸在 $43\ \mu\text{m}$ 时,由加权后得到的重建距离、振幅的CC曲线峰值和相位的CC曲线峰值确定的重建距离得到的重建放大像在粒子尺寸为 $43\ \mu\text{m}$ 时出现明显差异。尺寸为 $43$ 、 $39$ 、 $35$ 、 $31\ \mu\text{m}$ 的靶面粒子中,经由加权得到的重建像的粒子锐利度明显高于由振幅的CC曲线峰值、相位的CC曲线峰值所确定的重建像。由于实验等原因,尺寸为 $27$ 、 $23$ 、 $19\ \mu\text{m}$ 的粒子在图9(e),(f),(g)中锐利度都不高,图像比较模糊,但是可观测到图9(e)中对应的清晰度略优于图9(f),(g)。尺寸小于 $31\ \mu\text{m}$ 的粒子在该重建过程中对比不明显,但是由以上对尺寸大的粒子以及尺寸小的粒子综合分析,可以发现加权确定得到的重建像质量提高,锐利度提高。

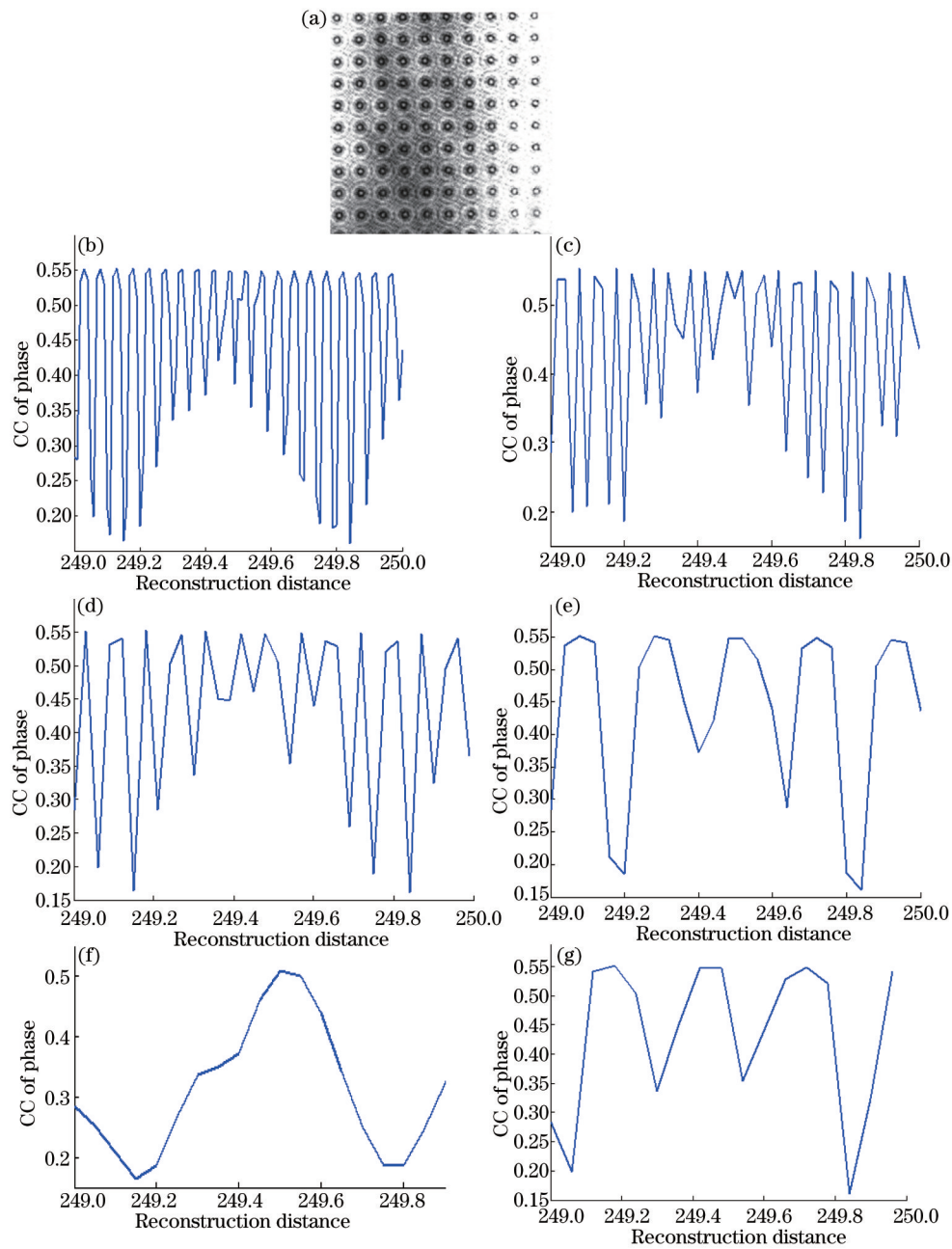


图 7 (a) 全息图( $\lambda=532.8$  nm); (b)~(g)相位的 CC 曲线, 依次  $\Delta Z=0.01$  mm, 0.02 mm, 0.03 mm, 0.04 mm, 0.05 mm, 0.06 mm

Fig.7 (a) Hologram( $\lambda=532.8$  nm); (b)~(g) CC curve of phase information:  $\Delta Z = 0.01$  mm, 0.02 mm, 0.03 mm, 0.04 mm, 0.05 mm, 0.06 mm respectively

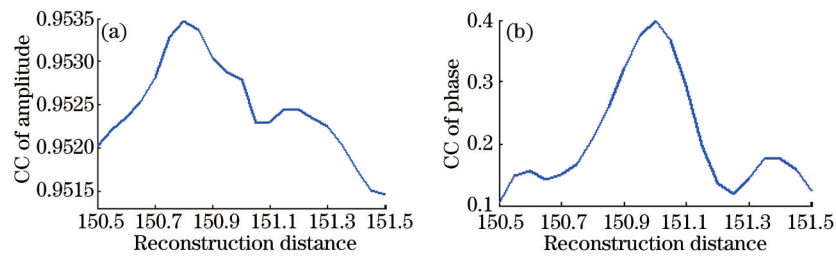


图 8 (a) 振幅的 CC 曲线; (b) 相位的 CC 曲线

Fig.8 (a) CC plot of amplitude; (b) CC plot of phase

## 4 结 论

对实验结果中由振幅的 CC 曲线峰值、相位的 CC 曲线峰值以及由加权后得到的重建距离得到的重建像

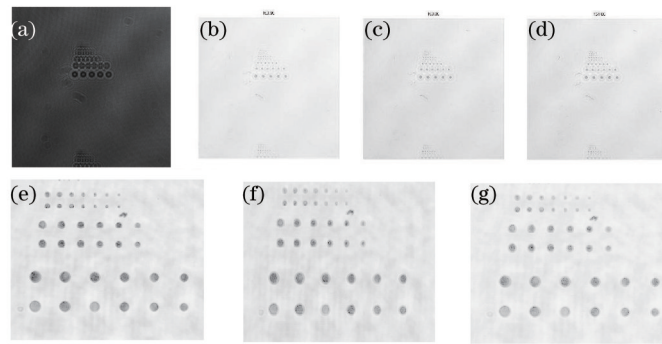


图9 (a)记录全息图; (b)加权后的重建图; (c)振幅所得重建图; (d)相位所得重建图; (e)对图(b)放大2倍后的部分区域图; (f)对图(c)放大2倍后的部分区域图; (g)对图(d)放大2倍后的部分区域图

Fig.9 (a) Recorded hologram; (b), (c), (d) reconstructed image by proposed method, intensity and phase respectively; (e) double amplification of (b); (f) amplification of (c); (g) amplification of (d)

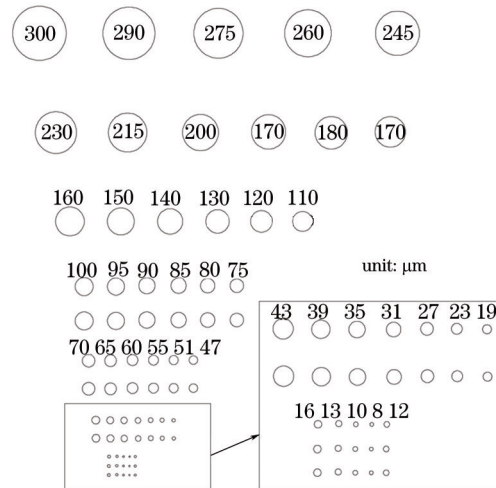


图10 标准靶面简图

Fig.10 Sketch of calibration target

的比较分析,以及将重建像放大2倍进行对比分析粒子的锐利度,对粒子尺寸为43、39、35、31  $\mu\text{m}$ 区域选取为兴趣区域分析后发现利用振幅和相位加权得到的重建像质量提高,锐利度提高。因此加权得到的焦平面能提高图像质量,更有利于实验中高精度的观测。利用本文中的方法,提高了物体的焦平面定位精度,解决了物体不在焦平面而导致重建像模糊。利用CC法,分别获得基于相位和振幅的CC曲线,再利用线性加权法进行加权得到重建距离。实验验证该方法能有效定位焦平面。

### 参考文献

- 1 D Gabor. A new microscopic principle[J]. Nature, 1948, 161(4098): 777-778.
- 2 J D Eraly, C Yourassowsky, F Dubois. Refocusing based on amplitude analysis in color digital holographic microscopy[J]. Opt Lett, 2014, 39(5): 1109-1112.
- 3 M Antkowiak, N Callens, C Yourassowsky, *et al.*. Extended focused imaging of a microparticle field with digital holographic microscopy[J]. Opt Lett, 2008, 33(14): 1626-1628.
- 4 J Gillespie, R A King. The use of self-entropy as a focus measure in digital holography[J]. Pattern Recognit Lett, 1989, 9(1): 19-25.
- 5 L Ma, H Wang, Y Li, *et al.*. Numerical reconstruction of digital holograms for three-dimensional shape measurement[J]. J Opt Soc Am A, 2004, 6(4): 396-400.
- 6 P Langehanenberg, B Kemper, D Dirksen, *et al.*. Autofocusing in digital holographic phase contrast microscopy on pure phase objects for live cell imaging[J]. Appl Opt, 2008, 47(19): D176-D182.
- 7 Y J Choo, B S Kang. The characteristics of the particle position along an optical axis in particle holography[J]. Meas Sci & Technol, 2006, 17(4): 761-770.

- 8 T Colomb, N Pavillon, J Kühn, *et al.*. Extended depth-of-focus by digital holographic microscopy[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(11): 1840–1842.
- 9 L Xu, M Mater, J Ni. Focus detection criterion for refocusing in multi-wavelength digital holography[J]. *Opt Express*, 2011, 19(16): 14779–14793.
- 10 Wu Yingchun, Wu Xuecheng, Cen Kefa. Development of digital holography in particle field measurement[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0601001.  
吴迎春, 吴学成, 岑可法. 数字全息测量颗粒场研究进展[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0601001.
- 11 Ouyang Liting, Wang Dayong, Zhao Jie, *et al.*. Experimental study on the phase-contrast imaging of the living hippocampal neuron cells by digital holographic microscopy[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0909001.  
欧阳丽婷, 王大勇, 赵洁, 等. 老鼠大脑海马区神经元活细胞的数字全息相衬成像实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0909001.
- 12 Wang Yunxin, Wang Dayong, Yang Yishu, *et al.*. Application and analysis in the biomedicine field using digital holographic technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209002.  
王云新, 王大勇, 杨怡姝, 等. 数字全息技术在生物医学成像和分析中的应用[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209002.
- 13 Y Yang, B S Kang, Y J Choo. Application of the correlation coefficient method for determination of the focal plane to digital particle holography[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(6): 817–824.
- 14 P Ferraro, G Coppola. Digital holographic microscope with automatic focus tracking by detecting sample displacement in real time[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(14): 1257–1259.
- 15 F Dubois, C Schockaert, N Callens, *et al.*. Focus plane detection criteria in digital holography microscopy by amplitude analysis[J]. *Opt Express*, 2006, 14(13): 5895–5908.
- 16 G Y Li, C H Lin, L L Tang, *et al.*. Focal plane location using integrated gray-level gradient method in digital particle holography [J]. *Optik*, 2012, 123(7): 609–616.
- 17 C C Deng, J Huang, G Y Li, *et al.*. Application of constrained least squares filtering technique to focal plane detection in digital holography[J]. *Opt Commun*, 2013, 291: 52–60.

栏目编辑: 何卓铭