

Gabor 同轴数字全息的多重再现与自动聚焦

刘 迪 王玉荣 孟祥锋 杨修伦 王青圃

(山东大学信息科学与工程学院山东省激光技术与应用重点实验室, 山东 济南 250100)

摘要 对于近场同轴数字全息在聚焦再现(再现距离精确等于实际记录距离)时,采用多重再现方法可以很好地消除共轭像的影响,但该方法没有考虑和分析再现距离与实际记录距离存在偏差时的影响。然而在实际应用中,实际记录距离难于精确测定,数字再现时采用的再现距离往往与实际记录距离存在偏差。对该方法进行了进一步的深入分析,分析发现该方法对距离偏差十分敏感,且随着距离偏差增大其共轭像消除效果会急剧下降;利用该方法对距离偏差的敏感特性,可以提高同轴数字全息自动聚焦的精准性和灵敏度。对上述结论进行了原理分析和实验验证。

关键词 全息; 同轴数字全息; Gabor 同轴数字全息; 聚焦函数; 自动聚焦

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0909002

Multi-Plane Reconstruction and Auto-Focus Method of Gabor In-Line Digital Holography

Liu Di Wang Yurong Meng Xiangfeng Yang Xiulun Wang Qingpu

(Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Technology and Application, School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract For the near-field in-line digital holography, the multi-plane reconstruction method used to eliminate the twin image works well when the reconstructing distance is exactly equal to the actual recording distance. However, it does not consider and analyze the influence when there is a deviation between the two distances. In practice, it is difficult to accurately measure the actual recording distance, and the deviation between the reconstructing distance and the actual recording distance always exist in the digital reproduction. A thoughtful analysis for this method is presented and it is found that this method is very sensitive to the distance deviation, and as the deviation increases its efficiency and effectiveness will be greatly decreased. The distance deviation sensitivity of this method can be used to improve the auto-focus accuracy and sensibility in the reconstruction of Gabor in-line digital holography. Principle analysis and experimental verification confirm the above conclusions.

Key words holography; in-line digital holography; Gabor in-line digital holography; focus function; auto-focus algorithm

OCIS codes 090.1995;110.3000; 260.5950

1 引 言

Gabor 同轴数字全息^[1-2]记录时的直透参考光波和衍射物光波同向传播且经历相同的路径和光学器件,具有光路简单、受环境振动和空气扰动影响小、对光源的相干性和记录器件的空间分辨率要求较低等优点,可广泛应用于颗粒场检测^[3-4]、流体动

力学分析^[5-6]、光学干涉测量^[7]、生物医学显微成像与检测^[8-9]等领域。但是,再现时共轭像和直流项与物体再现像在空间上相互交叠,无法采用傅里叶变换频谱滤波^[10]和相移干涉^[11-12]等方法来消除其影响。为消除直流项和共轭像的影响,文献中已经提出如基于数字图像处理技术^[13]、相位恢复迭代算

收稿日期: 2014-02-11; **收到修改稿日期:** 2014-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(61275014)、山东省科技计划(2011GGH20119)、山东省自然科学基金(ZR2011FQ011)

作者简介: 刘迪(1990-),女,硕士研究生,主要从事数字信息方面的研究。E-mail: zy1990liudi@163.com

导师简介: 王玉荣(1965-),男,博士,教授,主要从事信息光学、干涉测量及激光显示等方面的研究。

E-mail: yrw@sdu.edu.cn (通信联系人)

法^[14-17]、在不同距离处记录多幅全息图^[18-19]等多种方法。Yang 等^[20]提出一种适用于近场同轴数字全息、利用多重再现来消除直流项和共轭像的方法,该方法仅需记录一幅全息图,再现时以实际记录距离的奇数倍作为再现距离进行多重再现,通过对这些不同距离处的再现光波场进行加减运算,进而消除直流项和共轭像;该方法的依据是:对于近场同轴数字全息,再现时采用的再现距离越大,共轭像在物体再现像面上所形成的远场衍射越弱,对物体再现像的影响越小。

在数字全息记录时,物光波一般要经过不同折射率或不同厚度的待测样品及光学器件或介质空间,而这些折射率和厚度参数往往事先未知或难于精确测量;即使物光波是经过自由空间到达记录面,其实际记录距离也很难精确测量。因此,在数字全息再现时所采用的再现距离很难精确地等于实际记录距离,一般需要采用适当的聚焦函数和自动聚焦算法来确定最佳再现距离(最佳聚焦位置),进而在最佳聚焦位置处再现得到清晰的物体再现像。聚焦函数是指再现像的某种像质评价参量随调焦距离的变化。对于数字全息再现来说,当再现距离等于实际的记录距离(即处于最佳聚焦位置)时,聚焦函数具有最大或最小值,物体再现像最清晰。自动聚焦就是以一定步长逐渐增减再现距离,通过多次迭代并根据聚焦函数的峰值来确定最佳聚焦位置。针对数字全息再现,文献中已经提出多种自动聚焦方法^[21-24]。自动聚焦方法可以代替人眼进行图像的参量测量,避免主观因素的影响,确保全息再现和测量结果的精确可靠。

共轭像消除和自动聚焦是 Gabor 同轴数字全息技术应用中需要重点解决的问题。文献[20]针对近场同轴数字全息提出了用于消除共轭像的多重再现方法,该方法仅在再现距离精确等于实际记录距离时具有良好效果;其中没有考虑和分析再现距离与实际记录距离的偏差对共轭像消除效果的影响。考虑到在实际应用中实际记录距离难以精确测量,再现时采用的再现距离往往与实际记录距离存在偏差,所以该方法在实际应用中具有较大局限性。本文对文献[20]提出的多重再现方法进行了进一步的深入分析,分析发现:1)该方法对距离偏差十分敏感,当再现距离精确等于实际记录距离时其共轭像消除效果很好,但随着距离偏差增大,其共轭像消除效果会急剧下降;2)利用该方法对距离偏差的敏感特性,可以提高同轴数字全息自动聚焦的精准性和灵敏性。

并对上述结论进行了原理分析和实验验证。

2 原理和方法

2.1 Gabor 同轴数字全息的记录与再现

图 1(a)所示是 Gabor 同轴数字全息记录原理图。 P_0 和 P_H 分别为物面和全息记录面,二者之间的距离为 z ;激光器出射的光束经扩束准直后垂直照射位于 P_0 上的待测物体;位于 P_H 上的面阵光电探测器(如 CCD)用于记录由物体衍射光波和直透光波形成的干涉条纹强度分布。设待测物体是不透明的颗粒状物体,用 $a(x, y)$ 表示物体垂轴截面所占据的区域,当 (x, y) 位于物体所占据区域时, $a(x, y) = 1$;当 (x, y) 位于物体所占据区域之外时, $a(x, y) = 0$ 。用单位振幅单色平面光波照射物面 P_0 ,则透过物面的光场分布可表示为 $O(x, y) = 1 - a(x, y)$;经衍射传播到达记录面 P_H 上的光场分布 $O_D(x, y)$ 可表示为

$$O_D(x, y) = O(x, y) * h_z(x, y) = [1 - a(x, y)] * h_z(x, y), \quad (1)$$

式中 $*$ 表示卷积运算, $h_z(x, y)$ 为传播距离为 z 的衍射点扩展函数:

$$h_z(x, y) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2)\right], \quad (2)$$

式中 λ 为光波波长, $k = 2\pi/\lambda$ 。在得到(1)式过程中利用了 $1 * h_z(x, y) = 1$ 。(1)式表明到达记录面 P_H 上的光波场由两部分组成:第一项是直透光波,作为全息记录的参考光波;第二项是经物体衍射形成的衍射光波,作为全息记录的物光波;二者形成的干涉条纹强度分布为

$$I_H = |O_D|^2 = 1 + |a * h_z|^2 - a * h_z^* - a * h_z, \quad (3)$$

式中为表示简洁略去了坐标 (x, y) , $*$ 表示卷积,上标 $*$ 表示复共轭。该强度分布由 CCD 记录并以数字图像形式存储为数字全息图。

Gabor 同轴数字全息的再现过程如图 1(b)所示。用单位振幅单色平面光波垂直照射全息图,利用 $h_{z_1}(x, y) * h_{z_2}(x, y) = h_{z_1+z_2}(x, y)$ 和 $h_z^*(x, y) * h_z(x, y) = \delta(x, y)$ 及 δ 函数的卷积性质,当再现距离等于实际记录距离即 $z' = z$ 时,再现像面的光波场分布为

$$I_H * h_z = 1 + |a * h_z|^2 * h_z - a - a * h_{2z}, \quad (4)$$

式中右边第二项是物体在距离 z 处的衍射光场强度分布 $|a * h_z|^2$ 再经过距离 z 衍射后的光波场分布,对物体再现像的影响很小,可以忽略,此时(4)式可

表示为

$$I_H * h_z = 1 - a - a * h_{2z}, \quad (5)$$

式中右边的第 1 项是直透平面光波, 第 2 项是物体再现像, 第 3 项是共轭像, 它是物体在距离 $2z$ 处的

衍射光场分布。共轭像与物体再现像同时存在且在空间上同向传播, 会严重影响物体再现像的质量, 在进行全息显示和检测应用时应尽量消除。

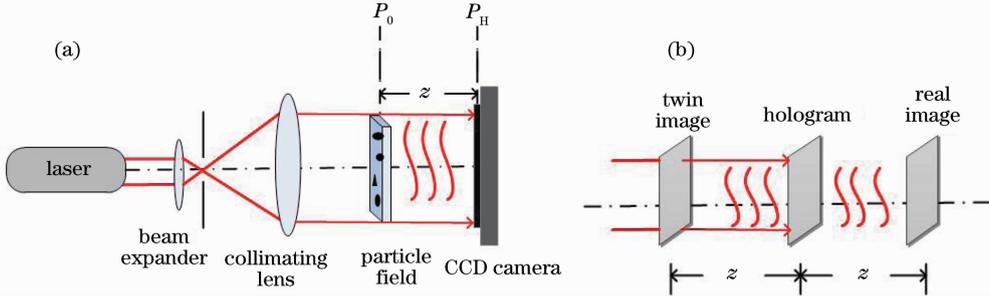


图 1 Gabor 同轴数字全息记录与再现原理示意图。(a) 记录; (b) 再现

Fig. 1 Principle diagram of Gabor in-line digital holography. (a) recording; (b) reconstruction

2.2 多重再现方法及其对距离偏差的敏感性与自动聚焦

2.2.1 多重再现方法

对于近场同轴数字全息, 文献[20]提出一种利用多重再现方法消除直流项和共轭像, 其原理是: 在实际记录距离的奇数倍处多次再现(如图 2 所示), 然后对这些奇数倍距离处的再现光波场进行适当加减运算, 进而消除直流项和共轭像。假设记录全息图时的实际记录距离 z 已知, 再现时采用的再现距离 z' 取为 $z' = z, 3z, 5z, \dots, (2n-1)z$, 其中 $n = 1, 2, 3, \dots, p$, 其中取 $n = p = 1$ 对应于传统的单次数字再现。利用 $h_{z_1}(x, y) * h_{z_2}(x, y) = h_{z_1+z_2}(x, y)$ 和 $h_z^*(x, y) * h_z(x, y) = \delta(x, y)$, 则在多个不同再现距离处的再现光波场分布可分别表示为

$$\begin{aligned} I_H * h_z &= 1 - a - a * h_{2z}, & n = 1 \\ I_H * h_{3z} &= 1 - a * h_{2z} - a * h_{4z}, & n = 2 \\ I_H * h_{5z} &= 1 - a * h_{4z} - a * h_{6z}, & n = 3 \\ I_H * h_{7z} &= 1 - a * h_{6z} - a * h_{8z}, & n = 4 \\ &\vdots & \vdots \\ I_H * h_{(2p-1)z} &= 1 - a * h_{2(p-1)z} - a * h_{2pz}, & n = p \end{aligned} \quad (6)$$

当 p 分别为奇数和偶数时, 由(6)式通过适当加减运算, 可分别得到

$$I_H * [(h_z - h_{3z}) + (h_{5z} - h_{7z}) + \dots + h_{(2p-1)z}] = 1 - a - a * h_{2pz}, \quad p \text{ is odd} \quad (7)$$

$$I_H * \{(h_z - h_{3z}) + (h_{5z} - h_{7z}) + \dots + [h_{(2p-3)z} - h_{(2p-1)z}]\} = -a + a * h_{2pz}. \quad p \text{ is even} \quad (8)$$

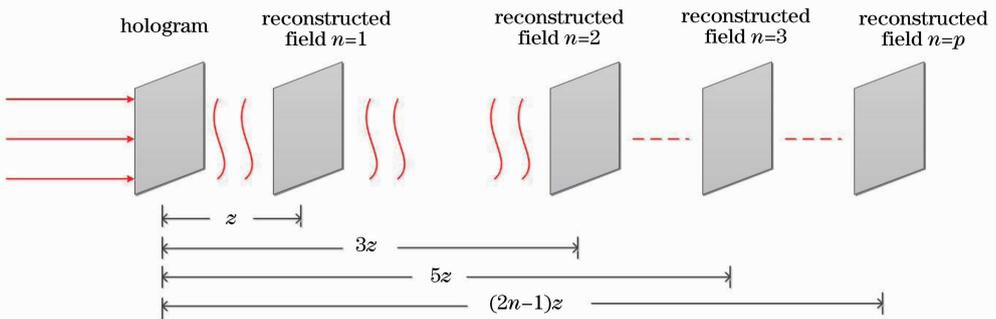


图 2 近场同轴数字全息多重再现方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-plane reconstruction method used for near-field digital in-line holography

(7)式右边的第一项是直透平面光波、第二项是物体再现像, (8)式右边的第一项是物体再现像。(7)式右边第三项和(8)式右边第二项反映了共轭像

的影响, 是物体在距离 $2pz$ 处的衍射光波场; 对于近场同轴数字全息, 它们会随着传播距离的增大(即 p 增大)而减弱并趋于均匀分布, 逐渐融为背景光,

对物体再现像的影响越来越小。因此,采用上述再现方法可以达到减弱或消除共轭像的目的。此外,比较(7)式和(8)式还可以看出,取 p 为偶数时不仅能消除共轭像的影响,还可将直透平面光波一并消除;而取 p 为奇数时则不能,实际应用中应取 p 为偶数、采用(8)式进行再现。

2.2.2 多重再现方法对距离偏差的敏感性分析与自动聚焦

在再现距离精确等于实际记录距离的情况下,利用(7)式和(8)式所示的多重再现方法可以消除或降

低共轭像的影响。然而,在实验或实际应用系统中,实际的记录距离很难精确测量或已知。若再现时采用的再现距离与实际记录距离有偏差,属于离焦再现,不能得到物体再现像,而是得到离焦再现像。设实际记录距离为 z ,再现时所采用的再现距离与实际记录距离的偏差为 Δz ,即为 $z + \Delta z$,采用上述多重再现方法再现时的距离分别为 $z + \Delta z, 3(z + \Delta z), 5(z + \Delta z), \dots, (2n-1)(z + \Delta z)$,此时,对于 $p=1, p=2, p=3$ 和 $p=4$,再现光波场可分别表示

$$I_H * h_{z+\Delta z} = 1 - a * h_{\Delta z} - a * h_{2z} * h_{\Delta z}, \quad (9)$$

$$I_H * [h_{z+\Delta z} - h_{3(z+\Delta z)}] = -a * h_{\Delta z} - a * h_{2z+\Delta z} + a * h_{2z+3\Delta z} + a * h_{4z+3\Delta z}, \quad (10)$$

$$I_H * [h_{z+\Delta z} - h_{3(z+\Delta z)} + h_{5(z+\Delta z)}] = 1 - a * h_{\Delta z} - a * h_{2z+\Delta z} + a * h_{2z+3\Delta z} + a * h_{4z+3\Delta z} - a * h_{4z+5\Delta z} - a * h_{6z+5\Delta z}, \quad (11)$$

$$I_H * [h_{z+\Delta z} - h_{3(z+\Delta z)} + h_{5(z+\Delta z)} - h_{7(z+\Delta z)}] = -a * h_{\Delta z} - a * h_{2z+\Delta z} + a * h_{2z+3\Delta z} + a * h_{4z+3\Delta z} - a * h_{4z+5\Delta z} - a * h_{6z+5\Delta z} + a * h_{6z+7\Delta z} + a * h_{8z+7\Delta z}. \quad (12)$$

(9)~(12)式均是多项式:1) (9)式和(11)式右边的第二项以及(10)式和(12)式右边的第一项, $a * h_{\Delta z}$, 已不再是精确的物体再现像,而是对应于物体在距离 Δz 处的衍射光场,是一个离焦量为 Δz 的离焦再现像;2) (9)式和(11)式右边自第三项以后的各项、以及(10)式和(12)式右边自第二项以后的各项,分别是物体在不同距离处的远场衍射,体现了离焦情况下共轭像在相应距离处的影响,尽管随着距离增加(即随着 p 取值增大或当 p 取定值时越靠后边的项)其中每一项的影响越来越弱,但各项之间相互叠加干涉,会给再现像的强度分布造成较大影响。

通过上述分析可知:在精确聚焦再现(即再现时采用的再现距离等于实际记录距离)的情况下,采用多重再现方法可以较好地消除共轭像;但在离焦再现的情况下,该方法的效果会大大降低;也就是说,该方法适用于实际记录距离精确已知情况,一旦再现时采用的距离与实际记录距离有偏差,这种方法会更加放大距离偏差对再现像的影响,距离偏差 Δz 越大,其共轭像消除效果下降就会越明显。因此,该方法对再现距离的精度要求很高,在聚焦位置附近对再现距离的变化很敏感。基于该方法在聚焦位置附近对再现距离变化很敏感这一特点,可将该方法与适当的聚焦函数相结合,用于 Gabor 同轴数字全息再现过程中提高自动聚焦的精准性和灵敏性,并在实现自动聚焦的同时消除共轭像。

理想的聚焦函数应具备以下主要特性^[21-24]:

1)单峰值性,聚焦函数应该在包含最佳聚焦位置在内的较大距离变化范围内只有一个极值点,且该距离变化范围越大越好;2)精准性,由聚焦函数运算得到的最佳聚焦位置应与实际聚焦位置一致;3)灵敏性,聚焦函数在最佳聚焦位置附近应该有明显的数值变化;4)假峰值少、噪声低,即使在较大距离变化范围内有多个极值点,除最佳聚焦位置的最大值或最小值外,其他极值点应尽量少,并且聚焦曲线的平均噪声应尽量低。尽管实际的聚焦函数很难在较大距离变化范围内完全具备上述特性,但在最佳聚焦位置附近应当达到上述要求。自动聚焦方法广泛应用于显微成像、数码成像、机器人视觉及数字全息等领域,文献中已提出多种聚焦函数及相应的自动聚焦算法^[22-39],大致可分为四大类:1)基于图像灰度梯度(导数)的聚焦函数^[24-34];2)基于图像灰度统计特性的聚焦函数^[23,35-37];3)基于图像灰度直方图特性的聚焦函数^[38];4)基于图像灰度值特性的聚焦函数^[24,35,39]。

根据文献[23-24]对多种聚焦函数的综合分析比较,在实验验证部分采用了图像灰度归一化方差函数 F_1 、灰度梯度向量平方函数 F_2 和图像能量函数作为聚焦函数 F_3 ,这三种聚焦函数分别属于三种不同类型,其定义分别为

$$F_1 = \frac{1}{MN} \sum_x \sum_y^N [g(x,y) - \mu]^2, \quad (13)$$

式中

$$\mu = \frac{1}{MN} \sum_x \sum_y^N g(x, y), \quad (14)$$

$$F_2 = \sum_x \sum_y^N \{ [g(x+1, y) - g(x, y)]^2 + [g(x, y+1) - g(x, y)]^2 \}, \quad (15)$$

$$F_3 = \sum_x \sum_y^N [g(x, y)]^2, g(x, y) \geq \tau, \quad (16)$$

式中 τ 为设置的灰度阈值。(13)~(16) 式中的 $g(x, y)$ 为图像中某点 (x, y) 处的灰度值, 图像大小为 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ 个像素。

3 计算机模拟实验验证

计算机模拟实验采用图 1 所示的记录光路。物面和记录面的大小均为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 每个像素大小为 $4.4 \mu\text{m}$; 待测物体如图 3(a) 所示, 其中含有多个大小和形状不同的不透明颗粒状物体; 光波波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 。根据抽样定理, 此时的最佳记录距离为 $15664 \mu\text{m}$, 模拟实验中取物面与记录面之间的距离 $z = 16000 \mu\text{m}$ 。图 3(b) 是在上述记录条件下得到的模拟数字全息图的强度分布。为了提高计算效率, 下面在计算聚焦函数值时只对红色边框内区域进行计算。

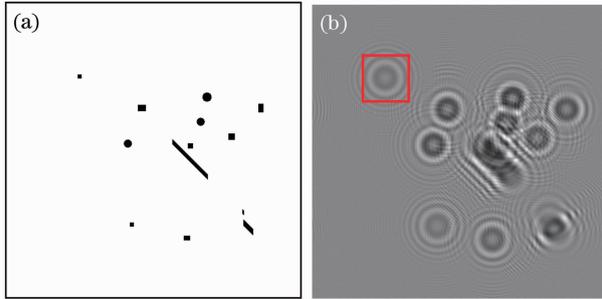


图 3 用于计算机模拟实验的待测物体及其 Gabor 同轴数字全息图

Fig. 3 Tested object used in computer simulation and its Gabor in-line digital hologram

3.1 聚焦再现情况下采用多重再现方法降低共轭像的影响

设实际记录距离已知, 且使再现距离等于实际记录距离(即离焦量 $\Delta z = 0$, 聚焦再现)。 $p = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ 时物体再现像的模拟结果如图 4 所示。采用图像灰度梯度向量平方函数 F_2 作为聚焦函数, p 取不同值时的聚焦函数值如表 1 所示。

由图 4 和表 1 可以得出: 1) p 取值为偶数时再现像背景是暗的, p 取值为奇数时再现像背景是亮的, p 为偶数时聚焦函数值整体上要大于 p 为奇数

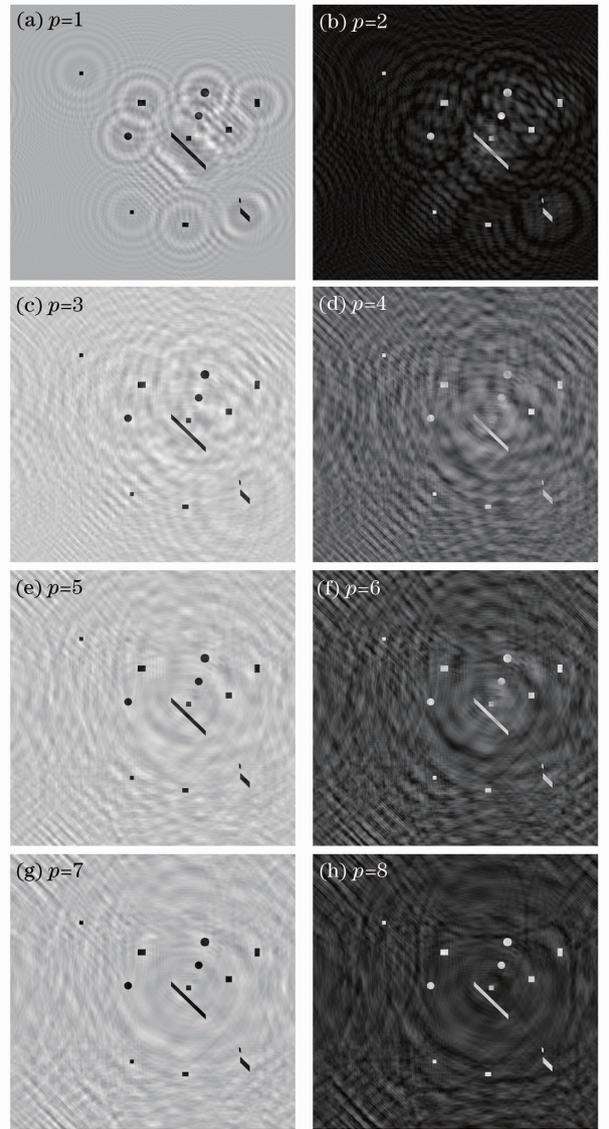


图 4 聚焦再现情况下当 p 取不同值时的再现像振幅分布
Fig. 4 Amplitude distribution of the reconstructed image at different p values

表 1 聚焦再现情况下聚焦函数值 F_2 随 p 的变化
Table 1 Values of focus function F_2 varies with p

p	F_2	p	F_2
1	16.51	5	19.12
2	23.40	6	25.06
3	17.85	7	20.42
4	24.17	8	20.63

时的数值, 这与(7)式和(8)式所示结果一致, 说明 p 为偶数时多重再现方法不仅可以减弱共轭像的影响, 还可以将直流项一并消除, 直流项的消除提高了再现像的质量, 因此, 实际应用中应取 p 为偶数进行再现; 2) 当 p 取偶数且较小时, 随着 p 值的增加, 聚焦函数值有一定增加, 但不是很明显, 当 p 进一步增大时会出现了下降的情况(在本模拟实验条

件下当 $p \geq 8$ 时), 这说明该多重再现方法适用于近场衍射, 且 p 的取值不能太大, 在实际应用中需要根据具体系统的结构参数适当选取 p 的取值。模拟实验条件下, 可以取 $p=2$, 这样既可以很好地消除共轭像和直流项, 又不至于过多增加计算量。

3.2 多重再现方法对距离偏差的敏感性与自动聚焦

根据文献[40]的分析, 本模拟实验条件下的再现景深约为 $32 \mu\text{m}$ 。在下面的多重再现方法对距离偏差的敏感性实验研究中, 离焦量依次取 $\Delta z=0, 32, 64, 96$, 其中 $\Delta z=0$ 对应于聚焦再现; p 分别取 1 和 2, 其中 $p=1$ 对应于传统的单次数再现。在上述不同离焦量下, $p=1$ 和 $p=2$ 时聚焦函数(灰度梯度向量平方数 F_2) 的函数值及其随离焦量的变化分别如表 2 和图 5 所示。从表 2 和图 5 可以看出: 聚焦函数值随着离焦量 Δz 的增大而下降, 并且 $p=2$ 时比 $p=1$ 时下降得更快。这说明, 对于 Gabor 同轴数字全息再现, 在聚焦位置附近, 采用多重再现算法(如 $p=2$)时聚焦函数值对离焦量的变化比采用单次再现算法($p=1$)时更敏感, 采用多重再现算法可以很好地提高聚焦函数的灵敏度。图 6(a)和(b)所示分别是 $p=1$ 时的聚焦再现像($\Delta z=0$)和离焦再现像($\Delta z=96 \mu\text{m}$); $p=2$ 时的聚焦再现像($\Delta z=0$)和离焦再现像($\Delta z=96 \mu\text{m}$)分别如图 6(c)和(d)所示; 由图 6 可以更加直观地看出, $p=1$ 时离焦再现像相比于聚焦再现像, 边缘虽变得模糊, 但尚可分辨; 而

$p=2$ 时的离焦再现像已经无法分辨出再现物体的边缘。上述实验结果与前面对(9)~(12)式的分析结果一致。

表 2 聚焦函数值 F_2 随离焦量 Δz 的变化

Table 2 Values of focus function F_2 varies with Δz

Δz	$p=1$	$p=2$
0	16.51	23.40
32	14.55	18.85
64	11.04	13.78
96	9.28	11.23

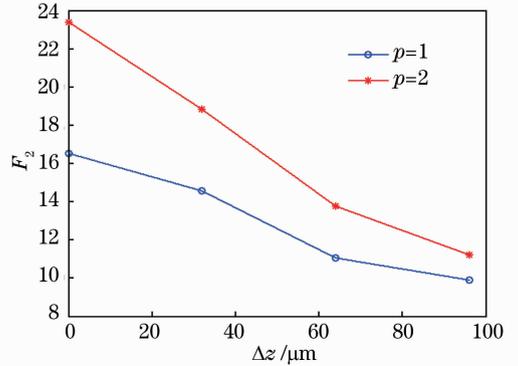


图 5 p 取不同值时聚焦函数值 F_2 随离焦量 Δz 的变化

Fig. 5 Values of focus function F_2 varies with Δz at different p values

模拟实验中物面与记录面之间的距离设定为 $16000 \mu\text{m}$, 即精确聚焦再现位置为 $z=16000 \mu\text{m}$, 此时离焦量 $\Delta z=0$ 。在精确聚焦位置附近 $\pm 1600 \mu\text{m}$

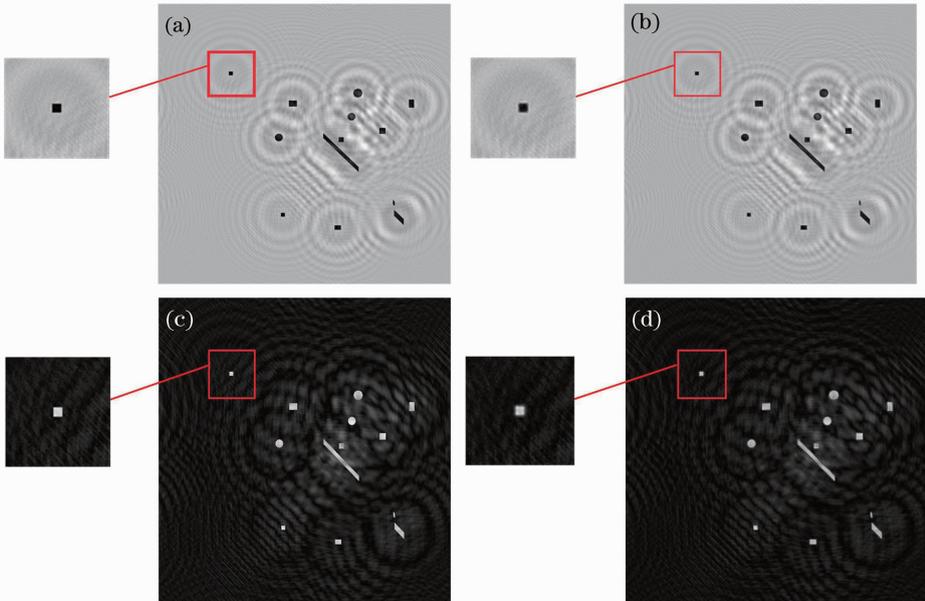


图 6 p 取不同值、不同离焦量时的再现像。(a) $p=1, \Delta z=0$; (b) $p=1, \Delta z=96 \mu\text{m}$; (c) $p=2, \Delta z=0 \mu\text{m}$; (d) $p=2, \Delta z=96 \mu\text{m}$

Fig. 6 Reconstructed images at different p values and different Δz . (a) $p=1, \Delta z=0$; (b) $p=1, \Delta z=96 \mu\text{m}$; (c) $p=2, \Delta z=0 \mu\text{m}$; (d) $p=2, \Delta z=96 \mu\text{m}$

的范围内、再现距离以步长 $32 \mu\text{m}$ 增减, 计算得到三种聚焦函数(F_1, F_2 和 F_3)的自动聚焦曲线。图 7 和图 8 分别是 $p=1$ 和 $p=2$ 时的三种聚焦函数的自动聚焦曲线, 图中纵坐标是归一化的聚焦函数值。比较图 7 和图 8 可以看出, 相比于 $p=1, p=2$ 时的自动聚焦曲线在最佳聚焦位置附近数值变化更明显, 曲线更加陡峭; 也就是说, 与单次再现方法($p=1$)相比, 采用多重再现方法($p=2$)可大大提高聚焦函数的灵敏性、信噪比和精准性。

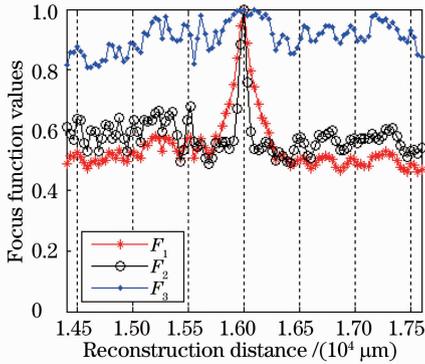


图 7 $p=1$ 时三种聚焦函数的聚焦曲线
Fig. 7 Focusing curve under $p=1$

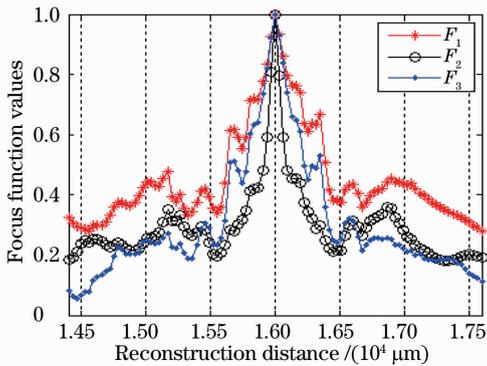


图 8 $p=2$ 时三种聚焦函数的聚焦曲线
Fig. 8 Focusing curve under $p=2$

4 光学实验验证

光学实验的记录光路如图 1(a)所示。待测物体为标准颗粒板, 颗粒直径为 $0.15 \mu\text{m}$ 。光源光波长为 $0.532 \mu\text{m}$ 。CCD 的像元大小为 $4.4 \mu\text{m} \times 4.4 \mu\text{m}$, 共有 $1600 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$ 。实验中初步测得的记录距离约为 $z=39000 \mu\text{m}$ 。

图 9 所示是在上述记录条件下得到的数字全息图的强度分布。以初步测得的记录距离为中心, 在其 $\pm 750 \mu\text{m}$ 的范围内以步长 $30 \mu\text{m}$ 增减再现距离, 分别采用单次再现方法($p=1$)和多次再现方法($p=2$)进行全息再现和自动聚焦实验。图 10 和

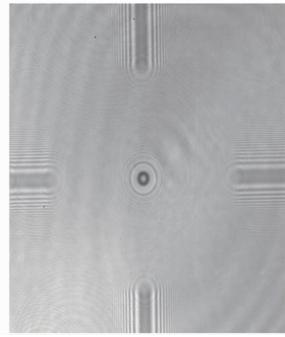


图 9 光学实验得到的 Gabor 同轴数字全息图
(1200 pixel \times 1200 pixel)

Fig. 9 Gabor in-line digital hologram obtained by optical experiment (1200 pixel \times 1200 pixel)

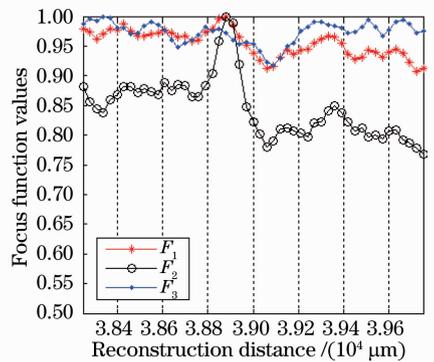


图 10 $p=1$ 时三种聚焦函数的自动聚焦曲线
Fig. 10 Automatic focusing curve under $p=1$

图 11 所示分别是 $p=1$ 和 $p=2$ 时的三种聚焦函数的自动聚焦曲线, 图中纵坐标是归一化的聚焦函数值。比较图 10 和图 11 可以看出, $p=1$ 时三条自动聚焦曲线没有在同一位置取得极大值, 因此我们无法判断出准确的聚焦位置; $p=2$ 时三条自动聚焦曲线不仅在同一位置($z=38880 \mu\text{m}$)取得极大值, 且在该位置附近数值变化更明显、聚焦曲线更加陡峭。因此, 可以认为本实验条件下的最佳聚焦位置为 $z=38880 \mu\text{m}$ 。图 12(a) 和 (b) 所示

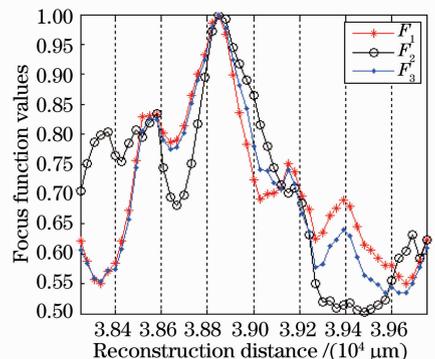


图 11 $p=2$ 时三种聚焦函数的自动聚焦曲线
Fig. 11 Automatic focusing curve under $p=2$

分别是再现距离取为 $38880 \mu\text{m}$ 时,采用单次再现法($p=1$)和多重再现法($p=2$)得到的再现像的振幅分布;比较两图可以看出,使用多重再现法得到的再现像不仅去除了直流项的影响,同时共轭像也有所减弱。以上光学实验结果与理论分析及计算机模拟实验结果一致。

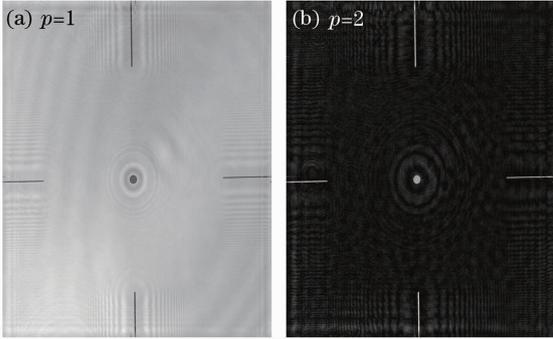


图 12 p 取不同值时的再现像振幅分布

Fig. 12 Reconstructed images at different p values

5 结 论

Gabor 同轴数字全息光路简单、应用广泛,消除共轭像和直流项的影响与自动聚焦是 Gabor 同轴数字全息应用中需要重点解决的问题。对文献中针对 Gabor 同轴数字全息提出的多重再现方法进行了深入分析,通过分析发现:该方法在精确聚焦再现(即再现时采用的再现距离等于实际记录距离)时可以很好的消除共轭像,但在离焦再现的情况下,离焦量越大其效果下降就会越明显;即该方法对再现距离的精度要求很高,在聚焦位置附近对再现距离的变化很敏感。基于这一特点,可将该方法与适当的聚焦函数相结合,用于提高 Gabor 同轴数字全息再现自动聚焦的精准性和灵敏性,并在实现自动聚焦的同时消除共轭像。计算机模拟实验和光学实验的结果均与理论分析一致,证明了上述结论的正确性。

参 考 文 献

- 1 Gabor D. A new microscopic principle [J]. Nature, 1948, 151(4098): 777-778.
- 2 J W Goodman, R W Lawrence. Digital image formation from electronically detected holograms [J]. Appl Phys Lett, 1967, 11(77): 77-79.
- 3 Kim M K. Tomographic three-dimensional imaging of a biological specimen using wavelength-scanning digital interference holography [J]. Opt Express, 2000, 7(9): 305-310.
- 4 Jia Jinchao, Mo Weidong, Li Zhaoxiang, *et al.*. Measurement of temperature field based on digital holography technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(3): 030903.

贾晋超,莫卫东,李照祥,等. 数字全息技术在温度场测量中的应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(3): 030903.

- 5 W Bishara, H Zhu, A Ozcan. Holographic opto-fluidic microscopy [J]. Opt Express, 2010, 18(26): 27499-27510.
- 6 Li Guangyong, Yang Yan. Digital holography partial image velocimetry applied for measurement of the rotating flow fields [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0609001.
- 李光勇,杨 岩. 数字全息粒子场图像测速技术应用于旋转流场测量的研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0609001.
- 7 J C Wyant. Testing aspherics using two-wavelength holography [J]. Appl Opt, 1971, 10(9): 2113-2118.
- 8 Myung K Kim. Application of digital holography in biomedical microscopy [J]. Opt Soc Korea, 2010, 14(2): 77-89.
- 9 Zhao Jie, Wang Dayong, Li Yan, *et al.*. Experimental study on the quantitative phase-contrast imaging of the biological samples by digital holographic microscopy [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2906-2911.
- 赵 洁,王大勇,李 艳,等. 数字全息显微术应用于生物样品相衬成像的实验研究 [J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2906-2911.
- 10 Cuhe E, Marquet P, Depeursinge C. Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography [J]. Appl Opt, 2000, 39(23): 4070-4075.
- 11 Weiqing Pan, Wei Lu, Yongjian Zhu. One-shot in-line digital holography based Hilbert phase-shifting [J]. Chin Opt Lett, 2009, 7(12): 1123-1125.
- 12 Kadono Hiroshi, Takai Nobukatsu, Asakura Toshimitsu. New common-path phase shifting interferometer using a polarization technique [J]. Appl Opt, 1987, 26(5): 898-904.
- 13 Akshay Sharma, Gyanendra Sheoran, Jaffery Z A, *et al.*. Improvement of signal-to-noise ratio in digital holography using wavelet transform [J]. Opt & Lasers in Eng, 2008, 46(1): 42-47.
- 14 Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. Optik, 1972, 35(2): 237-246.
- 15 G Liu, P D Scott. Phase retrieval and twin-image elimination for in-line Fresnel holograms [J]. J Opt Soc Am A, 1987, 4(1): 159-165.
- 16 G Z Yang, B Z Dong, B Y Gu, *et al.*. Gerchberg-Saxton and Yang-Gu algorithms for phase retrieval in a nonunitary transform system: a comparison [J]. Appl Opt, 1994, 33(2): 209-218.
- 17 Li Fang, Bi Yong, Kong Xinxin, *et al.*. An improved algorithm for multi-plane reconstruction with Gerchberg-Saxton phase retrieval algorithm [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1009001.
- 李 芳,毕 勇,孔新新,等. 一种基于 GS 相位恢复迭代算法的全息多平面显示的改进算法 [J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1009001.
- 18 Lu Rong, Feng Pan, Wen Xiao, *et al.*. Twin image elimination from two in-line holograms via phase retrieval [J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(6): 060902.
- 19 Guo Chengshan, Yue Qingyang, Wei Gongxiang. Laplacian differential reconstruction of in-line holograms recorded at two different distances [J]. Opt Lett, 2008, 33(17): 1945-1947.
- 20 Yang S, Xie X, Thuo Y, *et al.*. Reconstruction of near-field in-line holograms [J]. Opt Commun, 1999, 159(1-3): 29-31.
- 21 Sun Jie, Yuan Yue, Wang Chuanyong. Analysis and comparison of automatic digital image focusing algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(1): 35-39.
- 孙 杰,袁 跃,王传永. 数字图像处理自动图像聚焦算法的分析和比较 [J]. 光学学报, 2007, 27(1): 35-39.
- 22 Frans C Groen, Ian T Young, G Lighthart. A comparison of different focus functions for use in autofocus algorithms [J]. Cytometry, 1985, 6(2): 81-91.
- 23 Yu Sun, Stefan Duthaler, Bradley J Nelson. Autofocusing in computer microscopy: selecting the optimal focus algorithm [J]. Microscopy Research and Technique, 2004, 65(3): 139-149.
- 24 Hazar A Ilhan, Mert Dogar, Meric Ozcan. Autofocusing in

- digital holography[C]. SPIE, 2013, 8644: 86440C.
- 25 Santos A, Solo'rzano C O, Vaquero J J, *et al.*. Evaluation of autofocus functions in molecular cytogenetic analysis[J]. *Journal of Microscopy*, 1997, 188(Pt3): 264—272.
- 26 Brenner J F, Dew B S, Horton J B, *et al.*. An automated microscope for cytologic research[J]. *J Histochem Cytochem*, 1976, 24(1): 100—111.
- 27 Yeo T, Ong S H, Jayasooriah, *et al.*. Autofocusing for tissue microscopy[J]. *Image and Vision Computing*, 1993, 11(10): 629—639.
- 28 Krotkov E. Focusing [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1988, 1(3): 223—237.
- 29 Nayar S K, Nakagawa Y. Shape from Focus[J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mac Intell*, 1994, 16(8): 824—831.
- 30 Subbarao M, Choi T S, Nikzad A. Focusing techniques[J]. *Opt Eng*, 1993, 32(11): 2824—2836.
- 31 Yang G, Nelson B J. Wavelet-based auto-focusing and unsupervised segmentation of microscopic images[J]. *Proc IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2003, 3: 2143—2148.
- 32 Yang G, Nelson B J. Micromanipulation contact transition control by selective focusing and microforce control[J]. *Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2003, 3: 3200—3206.
- 33 Jiang Ting, Tan Yuegang, Liu Quan. Research of a clariey-evaluation fraction of image based on sobel[J]. *Computer and Digital Engineering*, 2008, 36(8): 129—131.
- 蒋 婷,谭跃刚,刘 泉. 基于 Sobel 算子的图像清晰度评价函数研究[J]. *计算机与数字工程*, 2008, 36(8): 129—131.
- 34 Liu Changgeng, Wang Dayong, Zhang Yizhuo, *et al.*. Derivatives-based autofocus algorithms for the digital holographic imaging[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 2989—2996.
- 刘长庚,王大勇,张亦卓,等. 数字全息成像中基于导数的自动对焦算法[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 2989—2996.
- 35 Groen F, Young IT, Ligthart G. A comparison of different focus functions for use in autofocus algorithms[J]. *Cytometry*, 1985, 6(2): 81—91.
- 36 Vollath D. Automatic focusing by correlative methods [J]. *Journal of Microscopy*, 1987, 147(3): 279—288.
- 37 Vollath D. The influence of the scene parameters and of noise on the behavior of automatic focusing algorithms [J]. *Journal of Microscopy*, 1988, 151(2): 133—146.
- 38 Firestone L, Cook K, Culp K, *et al.*. Comparison of autofocus methods for automated microscopy [J]. *Cytometry*, 1991, 12(3): 195—206.
- 39 Mendelsohn M L, Mayall B H. Computer—oriented analysis of human chromosomes-III focus [J]. *Computers in Biology and Medicine*, 1972, 2(2): 137—150.
- 40 M Adams, Th Kreis, W Juptner. Partical analysis with digital holography[C]. SPIE, 2000, 4101: 314—320.

栏目编辑: 何卓铭