

文章编号:1004-4213(2010)05-0893-5

利用相位模板实现数字全息超分辨成像*

袁操¹, 翟宏琛²

(1 昆明理工大学 理学院, 昆明 650093)

(2 南开大学 现代光学研究所, 天津 300071)

摘要:为了简化数字全息超分辨记录系统, 分别在其物光和参考光部分引入一块相位模板, 以获得垂直和倾斜方向照明物体的光束和具有不同载波频率的参考光束. 当这些具有不同照射方向的光透过物体后, 可以使 CCD 在位置固定的情况下记录到携带低频和低频信息的物体衍射场, 不同载波频率的参考光则保证了高频和低频信息在复合全息图的频谱面上能够相互分离. 实验结果证明, 通过将记录到的物体高频和低频信息合成, 可以获得超出系统衍射极限分辨率的再现像.

关键词:相位模板; 数字全息术; 合成孔径技术; 超分辨成像技术

中图分类号: O438

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20103905. 0893

0 引言

数字全息显微术利用电荷耦合器件 CCD 或 CMOS 成像元件记录全息图, 在计算机中模拟光学衍射过程获得再现像. 由于它克服了传统显微全息术需要化学湿处理和无法直接获得物体数据信息的缺点, 使得它得到越来越多研究人员的关注. 现在, 数字全息显微术已在生物、MEMS 器件检测、三维微测量、粒子场监视等领域中得到应用^[1-3].

分辨率是评价数字全息显微记录系统的一个重要指标, 其分辨率通常由显微物镜的数值孔径和记录波长共同确定, 在波长一定时, 使用大数值孔径的显微物镜可以有效提高记录系统的分辨率, 但是大数值孔径的显微物镜却具有工作距离和焦深短以及视场小的缺点, 而且显微物镜的像差对再现质量造成影响也难以消除.

合成孔径数字全息术是一种不需要在记录系统中使用显微放大系统即可获得高分辨率再现像的技术, 而且它还能突破由数值孔径决定的系统分辨率极限, 但是由于传统方法需要移动 CCD 或者物体以使系统能够记录到更多的物体信息, 因此它在记录过程中会耗费大量的时间, 而且对系统的稳定性要求也会很高^[4-5]. V. Mico 研究小组利用 VCSEL 阵列作为光源并结合空间复用技术完成了一次曝光记录到多幅子全息图的实验工作^[6-8]. 但该方法需要根

据物体的不同频谱特性在系统中放置不同的滤波模板以防止物体频谱信息的错误混叠, 所以该方法缺乏普适性. 本文作者曾提出利用飞秒激光脉冲宽度短的特性并结合角分复用技术设计了合成孔径数字全息的记录系统^[9], 该系统虽可根据不同的物体对其参数进行调整, 但是系统装置略显复杂.

本文提出一种通过在数字全息记录系统的物光和参考光部分分别插入参数可调的相位模板实现数字全息超分辨成像的方法. 由于相位模板可以在不使用诸多的分束镜和反射镜的情况就能为记录系统提供垂直和离轴照明的物光以及具有不同载波频率的参考光, 因此, 该方法除了可以大大简化记录系统还可增强系统的稳定性. 模拟实验结果可以证明在数字全息记录系统中应用相位模板, 可以获得超出数字全息记录系统衍射极限的高分辨再现像.

1 记录系统的原理分析

设相位模板、物体和 CCD 分别位于 $x_P - y_P$ 平面、 $x_O - y_O$ 平面和 $x_R - y_R$ 平面, 为了简化讨论, 将平面入射光的复振幅定义为常量 1, 相位模板只对入射光的相位产生调制而不影响其振幅分布, 相位模板的复振幅分布为

$$\begin{aligned} \text{Phase}(x_P, y_P) = & 1 + \exp(ik y_P \cos \beta_n) + \\ & \exp(-ik y_P \cos \beta_n) + \exp(ik x_P \cos \alpha_n) + \\ & \exp(-ik x_P \cos \alpha_n) \end{aligned} \quad (1)$$

通过设置 α_n 和 β_n 的数值可以使透过该相位模板的入射光分成沿五个不同方向传播的平面子光波. 当相位模板和物体距离很近时, 可以忽略衍射效应, 这五束平面光可表示为

$$O_n(x_O, y_O) = \exp[ik(x_O \cos \alpha_n + y_O \cos \beta_n)]$$

* 国家自然科学基金重点项目(60838001)、国家自然科学基金青年基金(60907002)、云南省自然科学基金(2008ZC033M)和昆明理工大学科学研究基金(2008-050)资助

Tel: 0871-5188317 Email: nkc.yuan@yahoo.com.cn

收稿日期: 2009-07-17

修回日期: 2009-09-16

$$(n=1,2\cdots 5) \tag{2}$$

上述五束光波透过物体后,被物体的透过率函数 $t(x_0, y_0)$ 调制,在数学上这个过程可表示为二者分布的乘积,即可以写成

$$D_n(x_0, y_0) = O_n(x_0, y_0)t(x_0, y_0) \tag{3}$$

当物体到 CCD 的距离满足菲涅耳近似条件时, CCD 记录到的衍射场分布可以写作

$$D_n(x_R, y_R) = C' \text{rect}\left(\frac{x_R}{L_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_R}{L_y}\right) \cdot \exp\left[j\frac{k}{2Z_0}(x_R^2 + y_R^2)\right] \iint t(x_0, y_0) O_n(x_0, y_0) \cdot \exp\left[\frac{jk}{2Z_0}(x_0^2 + y_0^2)\right] \exp\left[-j\frac{k}{Z_0}(x_0 x_R + y_0 y_R)\right] dx_0 dy_0 \tag{4}$$

式中, L_x 和 L_y 是 CCD 记录面的尺寸, CCD 对物体衍射场的限制作用可以用 rect 函数表示, C' 表示复常量因子. 将式(2)代入式(4), 并令

$$T\left(\frac{x_R}{\lambda Z_0}, \frac{y_R}{\lambda Z_0}\right) = F\{t(x_0, y_0)\} \cdot$$

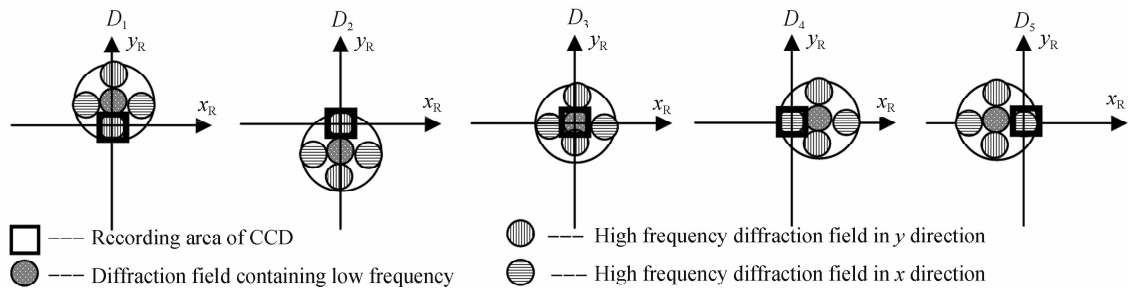


图 1 不同照明方向下 CCD 记录的衍射场信息
Fig. 1 Diffraction fields under the different

在垂直照明的情况下,也就是 $O_n(x_0, y_0) = 1$ 时,记录系统在 x 和 y 方向能够记录到的物体的最高空间频率可近似表示为

$$f_x = L_x / \lambda Z_0 \tag{6}$$

$$f_y = L_y / \lambda Z_0 \tag{7}$$

式中 L_x 和 L_y 分别为 CCD 的横向和纵向尺寸, λ 为记录光波的波长, Z_0 为物体与 CCD 之间的距离. 当离轴照明物体时,也就是式(2)中的 α_n 和 β_n 至少有一个不为 90° , 记录系统能够记录到的物体的最高空间频率在 x 和 y 方向分别为

$$f'_x = L_x / \lambda Z_0 + |\cos \alpha_n| / \lambda \tag{8}$$

$$f'_y = L_y / \lambda Z_0 + |\cos \beta_n| / \lambda \tag{9}$$

为了将记录到的高频和低频信息在再现平面上分离出来,需采用不同载波频率的参考光,同样,这些参考光可以利用一个相位模板产生,它们的复振幅表达式为

$$R_n(x_H, y_H) = \exp[-2\pi i(f_{xn}x_H + f_{yn}y_H)] \tag{10}$$

(n=1,2...5)

式中 f_{xn} 和 f_{yn} 是参考光的空间频率, n 取值不同,空

$$\exp\left[j\frac{k}{2Z_0}(x_0^2 + y_0^2)\right]$$

式中 F 是二维傅里叶变换,式(2)可以写成

$$D_n(x_R, y_R) = C' \text{rect}\left(\frac{x_R}{L_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_R}{L_y}\right) \frac{\exp(ikZ_0)}{i\lambda Z_0} \cdot \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda Z_0}(x_R^2 + y_R^2)\right] T\left(\frac{x_R}{\lambda Z_0} - \frac{\cos \alpha_n}{\lambda}, \frac{y_R}{\lambda Z_0} - \frac{\cos \beta_n}{\lambda}\right) \tag{5}$$

这个衍射场分布可以看作是透过率函数和二次相位因子乘积的角谱分布,通过改变模板的参量 α_n 和 β_n , CCD 记录到的物体频谱范围也会随之发生改变. 如图 1, CCD 的记录范围如图中粗线框所示,不同频谱信息用不同方向的条纹表示,当用不同方向的光照射物体时,衍射场会发生平移,即使在 CCD 位置不变的情况下,它也可以记录到物体的高频和低频衍射信息.

间频率也不相同. 这些不同载波频率的参考光和对应的物光发生干涉,所形成的复合全息图的强度分布为

$$I(x_H, y_H) = \sum_{n=1}^5 H_n(x_H, y_H) = \sum_{n=1}^5 |D_n(x_H, y_H) + R_n(x_H, y_H)|^2 \tag{11}$$

再现时,通过对该复合全息图进行傅里叶变换,得到的傅里叶频谱分布为

$$F\{I(x_H, y_H)\} = F\left\{\sum_{n=1}^5 H_n(x_H, y_H)\right\} = \sum_{n=1}^5 \{A_n(f_x, f_y) + FD_n(f_x - f_{xn}, f_y - f_{yn}) + FD_n^*(f_x - f_{xn}, f_y - f_{yn})\} \tag{12}$$

式中 $A_n(f_x, f_y)$ 是各幅子全息图的零级衍射像的傅里叶频谱, $FD_n(f_x, f_y)$ 和 $FD_n^*(f_x, f_y)$ 是共轭像的频谱分布. 从上面的表达式可知,可以通过控制 f_{xn} 和 f_{yn} 使各子全息图记录到的物体衍射场信息在频谱面上相互分离,从而可以利用频域滤波技术将其中的 FD_n 项滤出,再经过逆傅里叶变换和菲涅耳衍射计算便可求得 $D_n(x_0, y_0)$ 的分布. 消除由相位模

板引入的附加相位后,记录在各幅子全息图中的物体复振幅即可恢复.通过复振幅融合技术将物体的高频和低频融合起来,可以获得具有超高分辨率的再现像^[9].

2 模拟实验结果和分析

实验光路如图 2,激光发出的光经扩束准直后被分束镜 BS_1 分成参考光和物光,这两束光波分别经过位于物光光路的相位模板 $Phase\ Mask_1$ 和参考光光路的 $Phase\ Mask_2$ 后形成多组参物光对,这些参物光对干涉后形成的多幅子全息图被 CCD 记录,得到复合全息图.相位模板可由相位调节范围在 $[0, 2\pi]$ 纯相位型空间光调制器 SLM 实现(例如, Meadowlark 公司出产的透射式 SLM). $Phase\ Mask_1$ 可以为物体提供不同的附加相位,以使高、低频信息都能被记录,同时,当平面光波经过 $Phase\ Mask_2$ 后,会产生不同的载波频率的参考光.

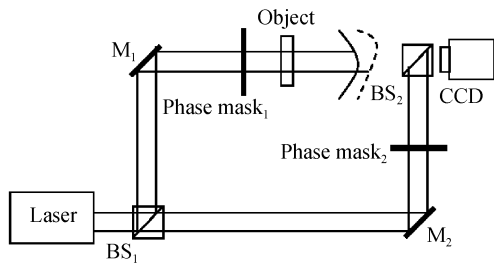


图 2 实验装置
Fig. 2 Experimental setup

模拟实验中,依据 USAF-1951 分辨率板的模式,设计了一块具有不同间距和尺寸的横向和纵向条纹的测试板,如图 5(a),其中条纹的最小空间频率为 5.9 LP/mm (第二单元第一组条纹);最高空间频率为 25.0 LP/mm (第三单元第六组条纹).物体和 CCD 之间的距离为 500 mm ,光源波长为 800 nm ,CCD 的像素尺寸为 $0.01\text{ mm} \times 0.01\text{ mm}$,像素为 512×512 .由这些参量可以根据式(6)和(7)计算出该记录系统在 x 和 y 方向的最大空间频率分辨率分别为 $f_x = 12.8\text{ LP/mm}$ 和 $f_y = 12.8\text{ LP/mm}$.

在物光部分使用的相位模板复振幅分布为

$$\text{Phase}(x_p, y_p) = 1 + \exp(ikx_p \cos \alpha_1 + y_p \cos \beta_1) + \exp(ikx_p \cos \alpha_2 + y_p \cos \beta_2)$$

式中, $(\alpha_1 = 89.4^\circ, \beta_1 = 90^\circ)$ 和 $(\alpha_2 = 90^\circ, \beta_2 = 89.4^\circ)$. CCD 记录的复合数字全息图如图 3(a),图 3(b)是局部放大效果;参考光和物体衍射光场的空间夹角分别是: $0.8^\circ, 0.6^\circ$ 和 1.0° , 它们的空间位置关系请参见文献^[9]图 1.图 3(c)是对图 3(a)进行傅里叶变换得到的频谱分布的结果,从中可知三幅子全息图的频谱是完全分开的.本文数据结合式(8)和式(9)可知,记录系统在 x 方向所能记录到的物体的最高

空间频率已从 12.8 LP/mm 增加到 25.9 LP/mm ; y 方向所能记录到的物体的最高空间频率从 12.8 LP/mm 增加到 25.9 LP/mm .

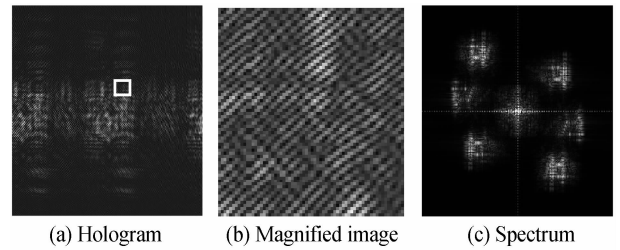


图 3 全息图及其频谱分布
Fig. 3 Hologram and its spectrum

分别提取复合全息图频谱中的一级像的频谱分布进行逆傅里叶变换和衍射计算,得到各子全息图的再现像分别如图 4.图 4(a)中第三单元第六组的纵向条纹 (25.0 LP/mm) 可以完全分辨,横条纹只能分辨到第三单元第二组 (12.5 LP/mm).从图 4(b)中可以分辨第三单元第二组的横条纹和纵条纹 (12.5 LP/mm),此时的再现结果和仅利用垂直照明的光照明物体得到的结果是相同的,它已接近系统的衍射极限分辨率 12.8 LP/mm .图 4(c)中可以分辨第三单元第六组的横条纹 (25.0 LP/mm) 和第三单元第二组的纵条纹 (12.5 LP/mm).

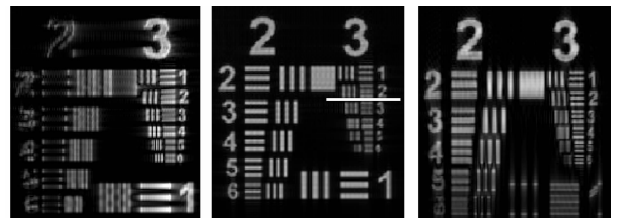


图 4 三幅子全息图的再现像强度分布
Fig. 4 Intensity distribution of reconstructed images of three sub-holograms

将三幅子全息图的再现像复振幅相加并消除附加相位,得到的结果如图 5(b),从图中可知,第三单元第六组横条纹和纵条纹都可以完全分辨,并且,实验数据与理论计算结果符合.实验结果表明,在记录系统中采用相位模板不仅能简化装置而且还能有效地提高记录系统的分辨能力.

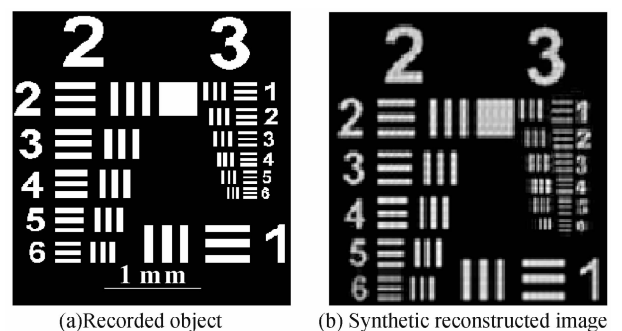


图 5 被记录物体和合成再现像
Fig. 5 Recorded object and the synthetic reconstructed

3 结论

通过在数字全息超分辨系统中应用可设置参量的相位模板不仅可以简化超分辨记录系统、增强系统的稳定性,而且,还可增强系统的普适性.在数字全息记录系统的物光和参考光路中分别插一块复合相位模板可以提供不同载波频率的物光以及参考光,不同载波频率的物光可以使物体的高频和低频信息都能进入系统的孔径内,参考光则可使进入到记录系统的高频和低频信息在复合全息图的频谱面上相互分离,不发生频谱混叠.通过模拟实验结果可知,在系统中应用相位模板可以达到与参考文献[9]完全一致的再现效果,合成再现像的分辨率在 x 和 y 方向都可达到 25.0 LP/mm,超出了系统的衍射极限 12.8 LP/mm.

参考文献

- [1] DUBOIS F, CALLENS N, YOURASSOWSKY C, *et al.* Digital holographic microscopy with reduced spatial coherence for three-dimensional particle flow analysis[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(5):864-871.
- [2] MARTINEZ-LEON L, PEDRINI G, OSTEN W. Applications of short-coherence digital holography in microscopy[J]. *Appl Opt*, 2005, **44**(19):3977-3984.
- [3] SHENG J, MALKIEL E, KATZ J. Digital holographic microscope for measuring three-dimensional particle distributions and motions[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(16):3893-3901.
- [4] CLERC F L, GROSS M, COLLOT L. Synthetic-aperture experiment in the visible with on-axis digital heterodyne holography[J]. *Opt Lett*, 2001, **26**(20):1550-1552.
- [5] MARTINEZ-LEON L, JAVIDI B. Synthetic aperture single-exposure on-axis digital holography[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(1):160-169.
- [6] MICO V, ZALEVSKY Z, GACIA J. Synthetic aperture microscopy using off-axis illumination and polarization coding[J]. *Optics Communications*, 2007, **276**(2):209-217.
- [7] MICO V, ZALEVSKY Z, GARCIA-MARINEZ P, *et al.* Superresolved imaging in digital holography by superposition of tilted wavefronts[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(5):822-828.
- [8] MICO V, ZALEVSKY Z, GARCIA-MARINEZ P, *et al.* Synthetic aperture superresolution with multiple off-axis holograms[J]. *J Opt Soc Am A*, 2006, **23**(12):3162-3170.
- [9] YUAN C, ZHAI H, LIU H. Angular multiplexing in pulsed digital holography for aperture synthesis[J]. *Opt Lett*, 2008, **33**(20):2356-2358.

Digital Holographic Super-resolution Imaging with Phase Mask

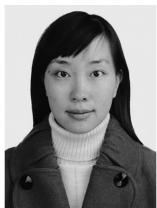
YUAN Cao-jin¹, ZHAI Hong-chen²

(1 *Science College, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China*)

(2 *Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

Abstract: In order to simplify the super-resolution imaging system, a phase mask is proposed and introduced into the object and reference beams part of the digital holographic recording system, respectively, to produce the on-axis and off-axis illumination beams and the sub-reference beams with different carrier frequency. The diffraction fields containing the low and high frequency information can be recorded by the CCD sensor whose position is fixed during the recording process with different illumination beams produced by phase mask. The low and high frequency information can be separated by reference beams with different carrier frequency in the spectrum plane of the composite hologram. After the frequency filtering followed by an inverse Fourier transform, the low and high frequency information can be obtained, and the object wavefront containing the low and high frequency information at the object plane can be obtained by calculating the Fresnel diffraction and removing the additional phases introduced by the object illuminations. The reconstructed image can be obtained by synthesizing the wavefront containing low and high frequency information of the recorded object. It can be known from the experiment that the resolution of the synthesized image is over that determined by the numerical aperture of the recording system.

Key words: Phase mask; Digital holography; Synthetic aperture; Super-resolution imaging



YUAN Cao-jin was born in 1981. She received her Ph. D. degree in optical engineering in 2008 from Nankai University. Her research interests focus on optical information processing and digital image processing.