

文章编号: 0253-2239(2004)04-465-7

数字全息中的一些基本问题分析*

钟丽云^{1,2} 张以谟¹ 吕晓旭² 钱晓凡² 熊秉衡²
(1 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)
(2 昆明理工大学激光研究所, 昆明 650051)

摘要: 利用全息理论、傅里叶频谱分析和采样定理,在模拟和数字全息光栅实验基础上,分析了数字全息记录和再现中的一些基本问题。结果表明:在物体和 CCD 尺寸确定的情况下,记录光路结构参量只取决于对图像采样的要求及 CCD 的像素尺寸,只要物体到 CCD 的距离满足采样要求,数字全息图再现光场的三个部分就可以分离;用准直平行光作为记录参考光和模拟再现光,可以得到与物体大小和形状完全一致的再现像;采样条件对再现像的影响大于分离条件,减小参物光的夹角记录适当过采样的数字全息图,有利于提高再现像的质量;另外,在获得高质量再现像方面,根据物体的具体特征,尽可能记录高质量的数字全息图,与满足采样条件和分离条件具有同样重要的意义。

关键词: 全息术; 数字全息; 菲涅耳衍射; 采样; 傅里叶变换

中图分类号: TB877 文献标识码: A

Analysis of Some Fundamental Issue about Digital Hologram

Zhong Liyun^{1,2} Zhang Yimo¹ Lü Xiaoxu^{1,2} Qi Xiaofan² Xiong Bingheng²

(1 College of Precision Instrument and Opto-electronic Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072
2 Laser Research Institute, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051)

(Received 3 January 2003; revised 16 May 2003)

Abstract: By use of holographic theory, Fourier transform frequency spectrum analysis and sampling theorem, this analysis of some fundamental issues about digital hologram by computer simulation and the experiment of digital grating is given. The results show: if the size of object and CCD is fixed, the structure parameter of the recording system only correlate with sampling requirement and the size of CCD pixels, and so as the distance between object and CCD accord with the sampling requirement, the three parts of digital reconstructed image can be separated. If the reference light and reconstructed light are both parallel light, the size and profile of the reconstructed image is equal to that of the object. Meanwhile the influence of sampling requirement is more than the separation condition, by decreasing the angle between reference light and object light, and recording certain over-sampling digital hologram, the quality of reconstructed image can be improved. Finally, in order to obtain high quality digital reconstructed image, it is also important to record high quality hologram according to object optical character.

Key words: holography; digital holography; Fresnel diffraction; sampling; Fourier transform

1 引 言

数字全息^[1]用电荷耦合成像器件 CCD 代替普通全息记录材料记录全息图,用计算机模拟再现取代光学衍射来实现所记录物场的数字再现,实现了全息图记录、存储、处理和再现全过程的数字化,给全息技术的发展和應用增加了新的方法。近年来,

* 国家自然科学基金(60277032)、云南省自然科学基金(2002F0030M)资助课题。

E-mail: zhongly@public.km.yn.cn

收稿日期:2003-01-03;收到修改稿日期:2003-05-16

随着高分辨率 CCD 的出现及计算机技术的高速发展,数字全息技术的测量精度不断提高,目前可以达到小于 $1\ \mu\text{m}$ 的横向分辨率和 nm 量级的纵向分辨率^[2],在微电路检测、粒度分析、透明场测量等小孔径、小视场对象测量和细胞观测等显微测量方面,数字全息能够充分发挥其特点和优势,有着广泛的应用前景^[3~8]。

与传统全息的记录相比较,数字全息术的主要缺点是源于记录全息图的 CCD 光敏面尺寸小(约 $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$)、分辨率低(小于 $100\ \text{lp/mm}$,“lp”表示“线对”)。要获得高质量数字全息图的再现像,除与传统全息技术类似,需要掌握好记录时条纹对比度和光场的亮度等条件以外,还要求在记录过程中满足采样条件(传统全息由于记录材料分辨率高,采样条件很容易满足),否则将导致信息记录的失败。针对上述问题,本文利用全息理论、频谱分析和采样定理,在计算机模拟和数字全息光栅实验基础上,分析了数字全息记录和再现中的一些基本问题,其结果可为高质量数字全息图的记录和再现提供有用的参考。

2 数字全息图的记录

数字全息的记录光路和普通全息完全相同,所记录的是理想薄全息图。一般来说,传统全息技术的理论与实验技术也适用于数字全息技术,但与传统记录材料的高分辨率($1000\ \text{lp/mm}$ 以上)和大记录面积($100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$ 以上)相比,目前的数字全息技术在有限距离内只能记录和再现较小物体的低频信息,而且对记录条件有其自身的要求。

图 1 是数字全息记录系统的简化示意图,其中 Z_0 是物体至 CCD 的距离, L_x^{CCD} 和 L_y^{CCD} 分别是 CCD 阵列面的长和宽, L_x^{obj} 和 L_y^{obj} 分别是物体的长和宽, C 是物体中心到 CCD 中心法线的距离, $\theta_{\text{OR}}^{\text{max}}$ 是参考光与物光的最大夹角, θ_0^{max} 是 CCD 法线与物光的最

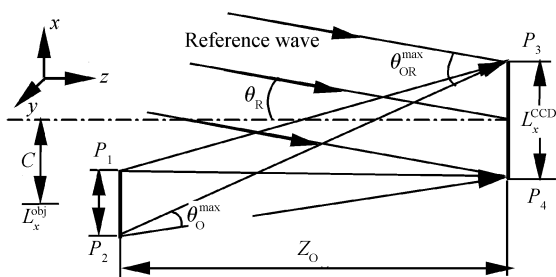


Fig. 1 Schematic of recording digital hologram

大夹角, θ_{R} 是以平面波作为参考光时,参考光与 CCD 法线的夹角, P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 分别是物体和 CCD 上的边缘点。

根据惠更斯-菲涅尔原理,到达 CCD 表面某点物光的复振幅是以物体上所有各点为点光源在该点的复振幅的叠加,合成波的传播方向是各子波合矢量的方向。为简单起见,下面仅讨论 xoz 平面内的情况,由于 P_2 点是物体与 CCD 表面法线成最大夹角 θ_0^{max} 的子波源,从矢量叠加原理和数字全息记录的条件可以知道, θ_0^{max} 也是 CCD 表面物光场传播方向与其法线的最大夹角,由图 1 可得

$$\sin \theta_0^{\text{max}} = \frac{[L_x^{\text{CCD}}/2 + (C + L_x^{\text{obj}}/2)]}{Z_0}, \quad (1)$$

一般情况下可使 $C = 0$,且在菲涅耳近似下, $Z_0 \gg L_x^{\text{CCD}}, L_x^{\text{obj}}$,此时

$$\theta_0^{\text{max}} = \frac{(L_x^{\text{CCD}} + L_x^{\text{obj}})}{2Z_0}. \quad (2)$$

物光对 CCD 的最大空间频率为

$$f_0^{\text{max}} = \frac{\theta_0^{\text{max}}}{\lambda} = \frac{(L_x^{\text{CCD}} + L_x^{\text{obj}})}{2\lambda Z_0}, \quad (3)$$

物光对 CCD 的带宽为

$$2B = 2f_0^{\text{max}} = \frac{(L_x^{\text{CCD}} + L_x^{\text{obj}})}{\lambda Z_0}, \quad (4)$$

根据全息原理^[9],要使再现实像与虚像的频谱分离,互不干扰,而且成像波不与背景光叠加,则参考光的空间频率应满足

$$f_{\text{R}} \geq 3B = \frac{3(L_x^{\text{CCD}} + L_x^{\text{obj}})}{2\lambda Z_0}, \quad (5)$$

在物光空间频率不大的情况下,参考光与 CCD 法线的最小夹角应为

$$\theta_{\text{R}}^{\text{min}} = 3B\lambda = \frac{3(L_x^{\text{CCD}} + L_x^{\text{obj}})}{2Z_0}, \quad (6)$$

参物光干涉条纹的空间频率应满足

$$f_{\text{OR}} \geq \frac{\theta_0^{\text{max}} + \theta_{\text{R}}^{\text{min}}}{\lambda} = \frac{2(L_x^{\text{CCD}} + L_x^{\text{obj}})}{\lambda Z_0}, \quad (7)$$

另一方面,如果在 x 方向的像元大小为 Δx ,根据奈奎斯特采样定理要求,一个条纹周期内的采样点不能低于 2 个,因此干涉条纹的空间频率应满足

$$f_{\text{OR}} \leq 1/(2\Delta x). \quad (8)$$

综合(7)式和(8)式可以得到数字全息记录光路的条件为

$$\frac{\lambda Z_0}{4(L_x^{\text{CCD}} + L_x^{\text{obj}})} \geq \Delta x, \quad (9)$$

(9)式具有简明的物理意义:只要参物光干涉条纹的最小间距符合采样条件,数字全息图再现光场的三个部分就可以完全分离。

(9)式和(6)式可以作为确定数字全息图记录光路结构参量的参考,但实际记录时还需要考虑多方面的因素。由于(9)式是在临界采样条件下得到的,一般情况下可以用(9)式取等号时得到的 Z_0 值记录数字全息图,就可以得到较好的再现效果,但为了取得更好的采样效果和克服噪声的影响,可以在计算得到的 Z_0 值上乘以 1.5~2 的系数。注意到(5)式是在对离轴全息图进行傅里叶变换的条件下给出的,实际记录的全息图具有全息透镜成像的性质,像面上的频谱空间被压缩,而且一般远离傅里叶频谱面,再现数字图像的清晰度高、幅值大,因此(6)式给出的参考光与 CCD 法线的夹角 θ_R^m ,对于数字全息图中的再现像分离已经是一个充分的要求,实验中可以根据距离 Z_0 和物体的大小,在估算的值上乘以 0.4~0.8 左右的系数,都不会影响到再现像的分离和质量。

物体的大小、衍射或散射性质对数字全息图的记录有重要的影响。由于目前 CCD 的尺寸小、分辨率低,决定了数字全息只能直接记录较小尺寸的物体及其低频信息,为了尽可能多的记录物体的空间信息,希望记录距离 Z_0 尽量小,但距离 Z_0 的减小会导致采样条件不满足并使再现像分离困难,降低其分辨率;反之,记录距离 Z_0 过大时,难以记录物体的高频信息,同样使再现像的分辨率降低。在目前情况下,为了满足数字全息的记录条件,必要时可以采用辅助光学系统对物体进行变换,例如显微数字全息技术^[9,10];另外,选择具有适当衍射或散射性

质的物体,会给记录带来很大方便,例如同样的边缘尺寸,矩形透射框的记录要比矩形透射孔的记录要容易得多;在记录散射物体时,还必须考虑记录面上散斑尺寸大小。

在传统全息图术中,衍射效率是评价全息图质量一个非常重要的指标,被定义为衍射成像光通量与再现照明光的总通量之比,它与曝光量和干涉条纹调制度都有关系,在线性曝光条件下,随曝光量和调制度的增加而增大。理想情况下,振幅型正弦全息图的衍射效率最大值为 6.25%。衍射效率的大小不仅反映再现光能利用率和像的亮度大小,而且综合反映了全息图的信噪比和记录失真情况。在数字全息术中,虽然影响全息图记录和再现质量的主要因素是采样条件,且数字全息图可以通过图像处理技术和其它方法使再现像的谱强度得到增强,但如果应用传统全息图记录的相同方法,调整参物比和利用 CCD 的性能记录对比度好、信息失真小的数字全息图,对提高再现像的清晰度、信噪比和可分离性极为有利。一般情况下,一幅记录良好的数字全息图,往往不必作任何处理,就可以得到高质量的再现数字图像。

3 数字全息图的再现

全息图的再现是光波通过全息图后产生的衍射光,在非涅耳近似下,再现光场可以描述为

$$U(x_1, y_1) = \frac{\exp(j2\pi Z_1/\lambda)}{j\lambda Z_1} \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda Z_1} (x_1^2 + y_1^2)\right] \times \iint_{-\infty}^{\infty} I(x, y) R_C(x, y) \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda Z_1} (x^2 + y^2)\right] \exp\left[-j2\pi\left(x \frac{x_1}{\lambda Z_1} + y \frac{y_1}{\lambda Z_1}\right)\right] dx dy, \quad (10)$$

其中 $U(x_1, y_1)$ 是 $z = Z_1$ 处再现光场的复振幅,其模平方 $|U(x_1, y_1)|^2$ 表示被记录物体的亮度信息,相位表示被记录物体的表面轮廓信息, $I(x, y)$ 是全息图, $R_C(x, y)$ 是全息图平面上再现光的复振幅。(10)式同样适用于数字全息的再现,与传统全息的再现不同的是:其中的 $I(x, y)$ 为数字全息图, $R_C(x, y)$ 是计算机模拟的再现光,再现光场可以直接显示在显示器上。

目前数字全息以检测方面的应用为主,再现像与物体之间的对应关系对检测结果有直接的影响。直接记录的数字全息图可以视为一幅薄振幅型全息

图,由于记录面不大,一般用准直光作为参考光记录数字全息图,尽管有激光束高斯分布的影响,但准直光的近似精度还是很高的,给拍摄和再现带来许多方便。如果用点光源记录和再现全息图,(10)式再现的两个再现像为^[9]

$$Z_1 = \left(\frac{1}{Z_C} \pm \frac{\lambda_2}{\lambda_2 Z_R} \mp \frac{\lambda_2}{\lambda_2 Z_O}\right)^{-1}, \quad (11)$$

$$x_1 = \left(\mp \frac{\lambda_2 Z_1}{\lambda_1 Z_O} x_O \pm \frac{\lambda_2 Z_1}{\lambda_1 Z_R} x_R + \frac{Z_1}{Z_C} x_C\right), \quad (12)$$

$$y_1 = \left(\mp \frac{\lambda_2 Z_1}{\lambda_1 Z_O} y_O \pm \frac{\lambda_2 Z_1}{\lambda_1 Z_R} y_R + \frac{Z_1}{Z_C} y_C\right), \quad (13)$$

其中 (x_1, y_1, Z_1) , (x_0, y_0, Z_0) , (x_R, y_R, Z_R) , (x_C, y_C, Z_C) 分别是像点、物点、参考光点和再现光点所在的位置, λ_1, λ_2 分别是记录和再现光的波长。如果记录和再现均用波长相同的准直光, 且再现光平行于全息图的法线入射, 则(11)式~(13)式可以简化为

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= \pm Z_0, \\ x_1 &= \pm x_0 \mp Z_0 \sin \theta_{R_x}, \\ y_1 &= \pm y_0 \mp Z_0 \sin \theta_{R_y}, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

即此时形成两个与物体形状和大小完全相同的再现像, 分别位于 $Z_1 = Z_0$ 和 $-Z_0$ 处, 中心对称于 CCD 的中心法线, 二者的横向分离情况与参考光的入射方向及物体至 CCD 的距离有关。

根据上述分析, 假设参物光干涉场经数字化后离散为 $N_x \times N_y$ 个点, 记录全息图的 CCD 光敏面尺寸为 $L_x^{\text{CCD}} \times L_y^{\text{CCD}}$, 通过空间采样后记录的数字全息图可表示为

$$I(k, l) = I(x, y) \text{rect}\left(\frac{x}{L_x^{\text{CCD}}}, \frac{y}{L_y^{\text{CCD}}}\right) \sum_{k=-N_x/2}^{N_x/2} \sum_{l=-N_y/2}^{N_y/2} \delta(x - k\Delta x, y - l\Delta y), \quad (15)$$

其中 k 和 l 为整数, $-N_x/2 \leq k \leq N_x/2$, $-N_y/2 \leq l \leq N_y/2$, Δx 和 Δy 是采样间隔, 且 $\Delta x = L_x^{\text{CCD}}/N_x$, $\Delta y = L_y^{\text{CCD}}/N_y$ 。利用离散的非涅耳积分, 用垂直入射的准直光再现, 则(10)式可以表示为

$$U(m\Delta\xi, n\Delta\eta) = A \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda Z_1}(m^2\Delta\xi^2 + n^2\Delta\eta^2)\right] \times \text{FFT}\left\{R_C I(k, l) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda Z_1}(k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)\right]\right\}_{m,n}, \quad (16)$$

其中 FFT 表示快速傅里叶变换,

$$A = \exp(j2\pi Z_1/\lambda) / j\lambda Z_1,$$

计算机模拟的数字再现光波已经简化为常数 R_C , 通常可以取为 1, m 和 n 是整数, 其取值范围一般可以分别为 $-N_x/2 \leq m \leq N_x/2$, $-N_y/2 \leq n \leq N_y/2$, N_x 和 N_y 分别是 CCD 在 x 和 y 方向参与采样的像素点总数, $\Delta\xi$ 和 $\Delta\eta$ 是观察平面的采样间隔, 在所述的 m 和 n 取值条件下, 其值分别为

$$\Delta\xi = \lambda Z_1 / L_x^{\text{CCD}}, \quad \Delta\eta = \lambda Z_1 / L_y^{\text{CCD}}, \quad (17)$$

(17)式被定义为再现像的横向极限分辨率。

4 数字全息的模拟与实验

下面对上述的分析进行数字全息的模拟计算, 其中模拟记录的 CCD 为 512×512 像素, 每个像素的尺寸为 $0.01 \text{ mm} \times 0.01 \text{ mm}$, 采样频率为 99.805 lp/mm 。

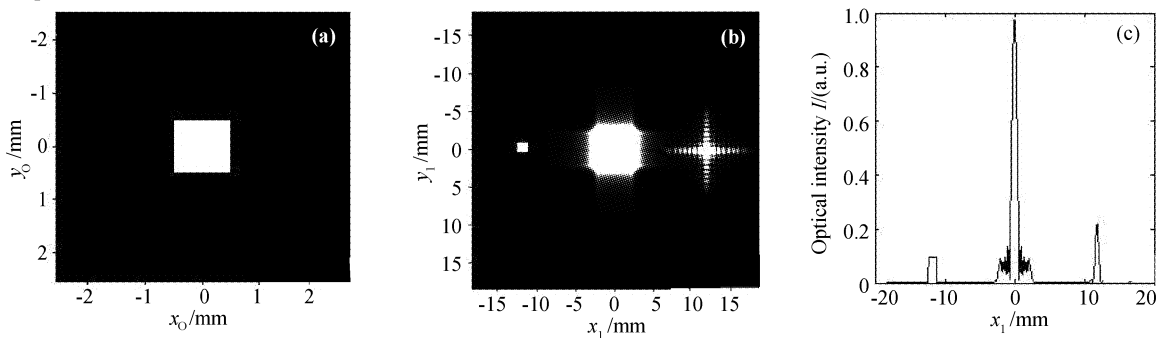


Fig. 2 A simulation of the reconstructing light field of the rectangle digital hologram which accords with the frequency spectrum separation

图 2(a)~图 2(c)分别模拟在满足再现频谱分离条件下, 一个边长为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的模拟矩孔、其再现光场和再现光场三部分中心连线上的强度分布图, 其中记录条件如图 1 所示, 矩孔的中心与 CCD 的中心在同一直线上, 参考光为平行光, 模拟数字全息记录时控制 Z_0 处的衍射光场大小为 $5.12 \text{ mm} \times 5.12 \text{ mm}$, 记录时采样要求为 $3\Delta x = 0.03 \text{ mm}$, 由(9)式和(6)式可得: $Z_0 = -580 \text{ mm}$, $\theta_{R_x}^{\text{min}} = 0.91^\circ$; 再现像由(16)式得到, 其中再现光的方向与 CCD 面垂直, 即取 $R_C = 1$, 记录和再现波长均为 632.8 nm , 再现距离与记录距离相同, 即 $Z_0 = Z_1$ 。图 3 表示的内容与图 2 相同, 只是参考光的夹角减小到 $\theta_{R_x} = 0.546^\circ$ 。

图 2(b)中由左至右的图案分别为在 $Z_1 = -580 \text{ mm}$ 处矩孔的再现像、中心再现光场和矩孔共轭再现像的衍射光场分布, 可见这三个部分已

经完全分离。如图 2(c) 所示, 像面上再现像的频谱所占的空间已压缩到 1 mm, 再现像的强度远远大于其附近背景光的强度。从图 3(b) 可以看出, 在

$\theta_R = 0.6\theta_{R\min}$ 的情况下, 虽然矩孔共轭再现像距其 580 mm 处的衍射光场与中心再现光场已经重叠, 但仍可以得到完全分离的再现像。

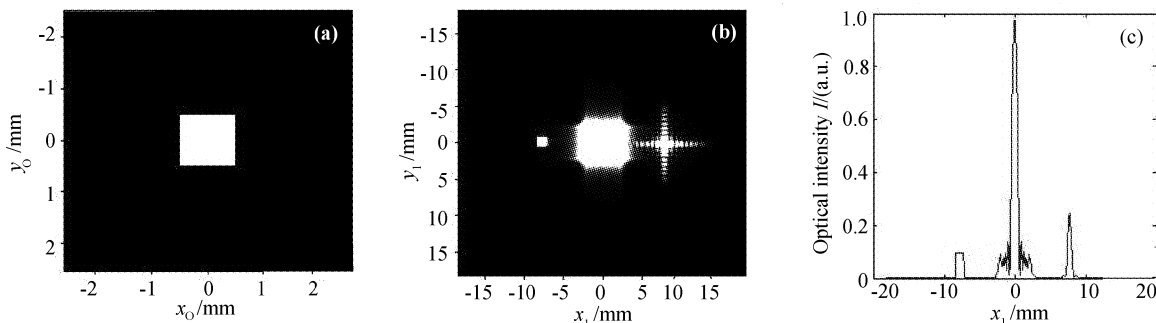


Fig. 3 A simulation of the reconstructing light field of the rectangle digital hologram which disaccord with the frequency spectrum separation

大量的模拟计算和实验都表明, 即使满足采样条件, 如果 CCD 采样频率不是干涉条纹的空间频率的整数倍, 一般在数字全息图上将会产生低频调制, 其调制频率随干涉条纹空间频率的增加而降低, 调制深度随空间频率的增加而加大, 这种现象使再现光场的频带展宽, 再现像的亮度和清晰度降低, 它是实际数字全息图记录和再现中需要考虑的重要因素。图 4(a)~图 4(d) 分别给出计算机模拟记录两平面光波干涉, 在 CCD 阵面上形成空间频率分别为 6.25 lp/mm、12.5 lp/mm、25.0 lp/mm 和 24.95 lp/mm 正弦干涉条纹的相对强度分布和对应的再现频谱图, 从图 4(a)~图 4(c) 可以明显地看出

低频叠加现象, 在对应的频谱图上还可以看出再现光场的频带展宽、主频率的幅度随空间频率增加而下降的现象。在图 4(d) 中, 由于所记录的空间频率是 CCD 采样频率的 1/4 倍, 低频调制与条纹采样点重合, 观察不到低频调制现象, 所以其再现频谱呈现理想分布。

在实际数字全息图的记录中, 由于上述各种因素的影响, 所记录的数字全息图的干涉条纹强度分布难以满足正弦规律, 其再现光场的分布远比模拟计算的复杂。为简明起见, 我们进行了数字全息光栅的实验记录与分析(数字全息光栅可以视为在任意位置均可成像的全息图), 它不仅给研究数字全息

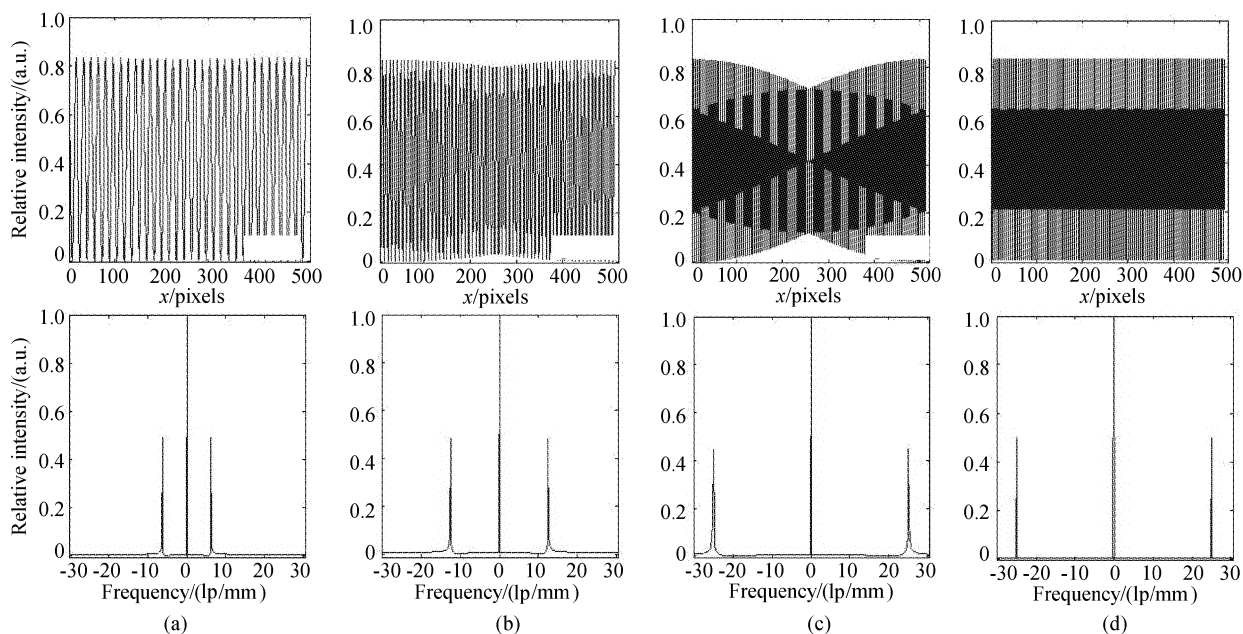


Fig. 4 Digital holographic grating and its reconstructed frequency spectrum with different spatial frequency.

(a) 6.25 lp/mm; (b) 12.5 lp/mm; (c) 25.0 lp/mm; (d) 24.95 lp/mm

的规律带来方便,而且也提供了一种准确确定参考光夹角的方法。记录全息图的 CCD 用卸去镜头的 MTV-1802CB 摄像头,像素数为 795 (H) \times 596 (V),像素大小为 0.010 mm \times 0.0108 mm,数字全息图的大小为 5.12 mm \times 5.54 mm。图 5(a)~图 5(c)分别给出了实际记录空间频率为 12.5 lp/mm 的数字全息图、再现频谱和有限距离的再现光场,可以看出:再现频谱中已经出现了 6.25 lp/mm 整数倍的若干次频谱,只是这些频谱的幅值很小,没有对再现像产生大的影响。这些次频的出现,是由于所记录的数字全息光栅图中规律性地交替出现了间距 0.08 mm 的最暗和次暗直条纹,在图中形成了两组空间频率均为 6.25 lp/mm 的次条纹,图 5(c)中出

现的频谱,应为条纹图中各组不同空间频率条纹衍射叠加的结果。次条纹表现的现象和对再现光场的影响程度,除了与满足采样条件的程度有关外,还与干涉条纹的初相位(干涉条纹与 CCD 的相对位置)有关,具有一定的随机性。图 6(a)~图 6(c)分别给出了实际记录的空间频率为 22.85 lp/mm 的数字全息图再现频谱和有限距离的再现光场,可以看出:由于干涉条纹空间频率的增加,数字全息图出现了严重的混叠,在再现频谱图中出现了一个幅值较大的低频频谱,且主频谱的幅值明显下降,使得再现像的内侧出现了一个强度较大的附加像,在记录和再现实际物体的数字全息图时,这种附加像会严重影响再现像的质量。

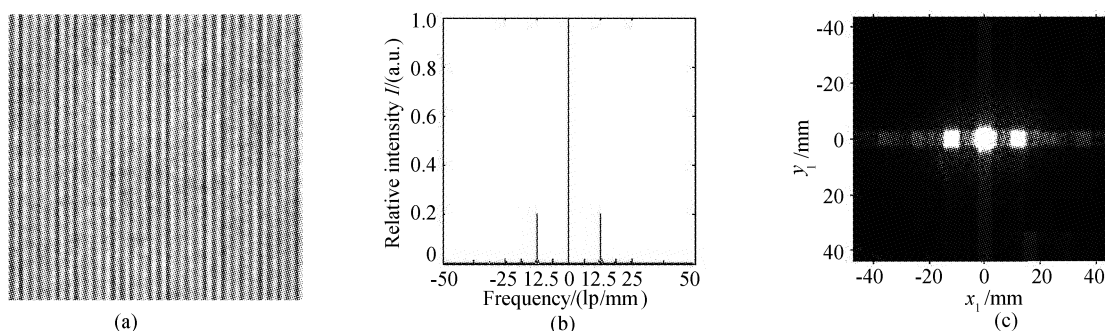


Fig. 5 (a) 12.5 lp/mm digital holographic grating; (b) reconstructed frequency spectrum; (c) reconstructed light field in a certain distance

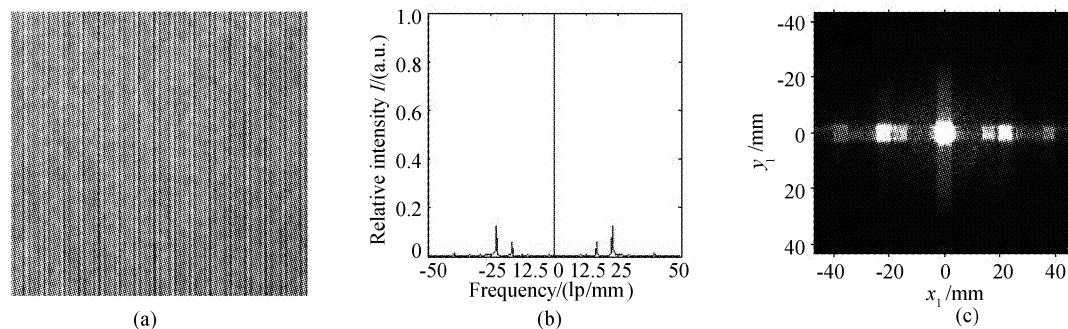


Fig. 6 (a) 22.85 lp/mm digital holographic grating; (b) reconstructed frequency spectrum; (c) reconstructed light field in a certain distance

与前述的计算机模拟结果进行比较可以看出:在实际全息图的记录中,由于噪声、照明光场的不均匀性、物光衍射光场的调制和 CCD 动态范围的影响,一般难以记录到强度正弦分布的理想数字全息图,这时再现光场中除了存在理想全息图再现时的三个光场外,还可能出现若干低频和高频次谱。在记录实际物体时,这些次谱往往混杂在物光信息中,很难滤除,因此尽可能根据不同物体的衍射特点记录到理想的数字全息图,对获得高质量再现像也是非常重要的。

结论 本文利用全息理论、频谱分析和采样定理,在计算机模拟和数字全息光栅实验基础上,分析了数字全息的记录和再现中的一些基本问题。研究表明:要获得高质量数字全息图的再现像,除与传统全息技术类似,需要根据物体的具体特征,掌握好记录时条纹对比度和光场亮度等条件,尽可能记录高质量的数字全息图以外,还要求在记录过程中满足采样条件,而且采样条件对数字再现像质量的影响大于分离条件的影响,只要数字全息的记录满足过采样条件,所记录的数字全息图再现时就可以得到

分离的再现光场。

参 考 文 献

- 1 Goodman J W, Lawrence R W. Digital image formulation from electronically detected hologram. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **11**(3):77~79
- 2 Cuhe E, Marqret P, Depeursinge C. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis hologram. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(34):6994~7001
- 3 Adama M, Kreis T, Juptner W. Partical size and position measurement with digital holography. *Proc. SPIE*. 1997, **3098**:234~240
- 4 Yamaguch I, Zhang T. Phase-shifting digital holography. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16):1268~1270
- 5 Marquardt E, Richer J. Digital image holography. *Opt. Engng.*, 1998, **37**(5):1514~1519
- 6 Cuhe E, Marquet P, Depeursing C. Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography. *App. Opt.*, 2000, **39**(23):4070~4075
- 7 Liu Cheng, Li Liangyu, Li Yinzhu *et al.*. Digital holography free of zero-order diffraction and conjugate image. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(4):427~431 (in Chinese)
- 8 Zhao Jianlin, Tan Haiyun. Measuring three-dimensional temperature foeld by digital holographic interferometry. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(12):1447~1451 (in Chinese)
- 9 Su Xianyu, Li Jitao. *Information Optics* (信息光学). Beijing: Science Press, 1999. 118~136 (in Chinese)
- 10 Zhang T, Yamaguchi I. Three-dimensional microscopy with phase-shifting digital holography. *Opt. Lett.*, 2001, **23**:1221~1227
- 11 Evans A K. Resolution limits and noise reconstruction in digital holographic microscopy. *Proc. SPIE*, 2002, 4659~4664