

文章编号: 0253-2239(2004)09-1209-5

球面参考光波数字全息的一些特点分析及实验*

钟丽云^{1,2} 张以谟¹ 吕晓旭^{1,2} 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: 对以球面波作为参考光记录数字全息图的采样和再现分离条件进行了详细的分析。推导出了同时满足采样和再现分离条件时, CCD 及物体的横向尺寸、物体及参考光源至 CCD 的距离之间需要满足的关系式, 证明了完全散射物体上复振幅在记录面上的叠加可以等效为一个点光源在记录面上产生的效果, 进行了相应的实验研究。结果表明: 数字全息术中采用球面参考光波可以比采用平面参考光波更容易满足采样和分离条件, 并可以记录到更多的物体信息; 在物体至 CCD 的距离固定的情况下, 无透镜傅里叶变换全息术是优化的记录光路结构; 散射物体比衍射物体的数字全息图更容易满足采样和分离条件。

关键词: 信息光学; 数字全息; 采样定理; 频谱分离; 球面参考光波; 无透镜傅里叶变换全息术
中图分类号: TN877 文献标识码: A

Analysis of the Characteristics about the Digital Holography of the Spherical Reference Wave

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

(¹ School of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)
(² Laser Research Institute, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051)

(Received 26 May 2003; revised 1 December 2003)

Abstract: Based on some detailed theoretic analysis about the recording sampling and reconstructing separation requirement for the digital holography of the spherical reference wave, the relationship fulfilling above requirement for the lateral size of the object and CCD, the distance between the object, CCD and the reference wave point source are deduced. In the recorded plane, it is proved that the superposed complex amplitude of the scattering object is equivalent to that of a point source. The theoretic analysis and experimental results show: Compared with the digital holography of the plane reference wave, it is easier for the digital holography of the spherical reference wave to fulfill the requirements recording sampling and reconstructing separation meanwhile, to record more object information. If the distance between the object and CCD is unchangeable, lensless Fourier holography is the optimum digital recording system in improving the resolution of reconstructing image and enlarging the size of the recording object. If the recording condition is same, it is more difficult to record the digital hologram of the scattering object than that of the diffracting object.

Key words: information optics; digital holography; sampling theorem; frequency separation; spherical reference wave; lensless Fourier holography

* 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: 2003-05-26; 收到修改稿日期: 2003-12-01

1 引 言

数字全息术^[1]用电荷耦合器件(CCD)代替普通全息材料记录全息图, 用计算机模拟再现光场进行数字全息图的数字再现, 实现了全息技术记录、存储

和再现全过程的数字化,为全息技术的发展和应用程序增加了新的内容和方法,有着广泛的应用前景。

与传统全息记录材料相比,目前用于记录数字全息图的 CCD 成像面小(典型值约 $1\sim 4\text{ cm}^2$)、像元尺寸大约 $6\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 、光强响应的动态范围不足,使得数字全息图的采样频率低,难以象传统全息图一样记录到足够的物光信息。因此,数字全息的再现像清晰度低、噪声大、测量系统分辨率低,成为制约数字全息发展和应用的主要问题^[2~7]。用球面参考光波记录数字全息图是解决上述问题的主要方法,在进行高分辨数字全息和用数字全息记录较大尺寸的物体时,一般都采用球面波作为参考光^[8,9]。本文对球面参考光波记录数字全息图的采样和再现分离条件进行详细的分析,提出了一些提高数字全息系统分辨率和扩大物体尺寸的方法,及其相应的记录光路结构。

2 球面参考光波记录数字全息图的采样和再现分离条件

为简化推导和不失一般性,在非涅耳近似条件下,从处于同一平面内的两个点光源的干涉,来分析满足采样和分离条件的数字全息记录光路结构规律,讨论点源参考光波中心与所记录物体在同一平面内的无透镜傅里叶变换全息图的记录和再现情况。

2.1 菲涅耳近似下数字全息记录的几何关系

图 1 为采用球面波作为参考光记录数字全息的记录光路示意图,其中坐标系的取向表示如图中的左下角所示, z 轴与 CCD 中心的法线重合。

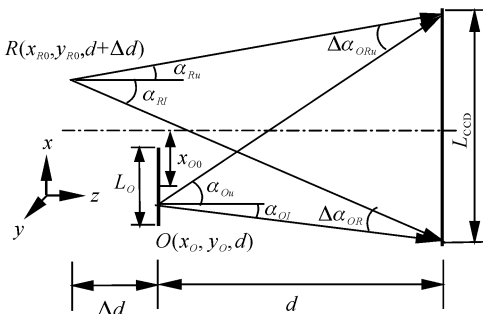


Fig. 1 Schematic of recording a digital hologram by use of a spherical reference wave

物体的一个截面和参考光点源都在 xoz 平面内, d 和 Δd 分别是沿 z 轴方向物体至 CCD 的距离和点源的距离, L_{CCD} 和 L_O 分别是 CCD 图像采集面和该面内记录物体的横向尺寸, $R(x_{R0}, y_{R0}, d + \Delta d)$ 和

$O(x_0, y_0, d)$ 分别是参考点源和物体上任意一点的位置, x_{O0} 和 x_{R0} 分别是物体中心和参考点源到 CCD 中心法线的距离, $\alpha_{Ru}, \alpha_{Rl}, \alpha_{Ou}$ 和 α_{Ol} 分别是参考光点及物体上任意一点到达 CCD 上端和下端的光线与 z 轴的夹角, $\Delta\alpha_{ORu}$ 和 $\Delta\alpha_{ORl}$ 分别是 CCD 上端和下端参考光与物光的夹角。在非涅耳近似下, $d \gg L_{CCD}, L_O$, 参考光点及物体上任意一点到达 CCD 上任意一点的光线与 z 轴的夹角分别为

$$\alpha_R = \frac{x_{CCD} - x_{R0}}{d + \Delta d}, \quad (1)$$

$$\alpha_O = \frac{x_{CCD} - x_O}{d}, \quad (2)$$

在 CCD 上任意一点,参物光之间的夹角为

$$\Delta\alpha_{OR} = \alpha_O - \alpha_R = \frac{x_{CCD} - x_O}{d} - \frac{x_{CCD} - x_{R0}}{d + \Delta d} = \frac{d(x_{R0} - x_O) + \Delta d(x_{CCD} - x_O)}{d(d + \Delta d)}, \quad (3)$$

若记录光波的波长为 λ , 该点所对应的干涉条纹的空间频率为

$$f_{OR} = \frac{\Delta\alpha_{OR}}{\lambda} = \frac{d(x_{R0} - x_O) + \Delta d(x_{CCD} - x_O)}{\lambda d(d + \Delta d)}. \quad (4)$$

在数字全息图的记录中,一般应使物体的中心位于 z 轴上,即 $x_{O0} = 0$, 这样做的优点是 CCD 可以对称地记录物体的信息,此时物光波与 CCD 法线的最大夹角为

$$\alpha_{Omax} = \frac{L_{CCD}/2 + L_O/2}{d}, \quad (5)$$

由于 CCD 上任一点的物光场的分布,是物体上各点在该点复振幅的叠加,从衍射叠加原理和图 2 所示的衍射分矢量及合矢量与 z 轴夹角关系可知,(5)式所决定的角度就是衍射光与 z 轴的最大夹角。

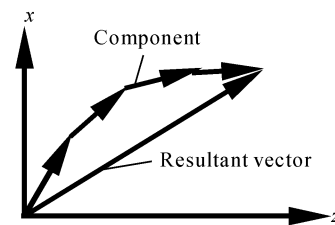


Fig. 2 Angles of the components and the resultant vector between z -axis

由图 1 和(3)式可以推出,当物体和 CCD 的尺寸已固定时,参物光的最小和最大夹角分别为

$$\Delta\alpha_{Omin} = \frac{\pm L_{CCD}/2 - L_O/2}{d} - \frac{\pm L_{CCD}/2 - x_R}{d + \Delta d}, \quad (6)$$

$$\Delta\alpha_{Omax} = \frac{\pm L_{CCD}/2 + L_O/2}{d} - \frac{\pm L_{CCD}/2 - x_R}{d + \Delta d}, \quad (7)$$

其中(6)式和(7)式中的正、负号,分别对应于 $\Delta d > 0$ (参考光点源至 CCD 的距离大于物体至 CCD 的距离)和 $\Delta d < 0$ (参考光点源至 CCD 的距离小于物体至 CCD 的距离)时的情况。当 $\Delta d > 0$ 时,(6)式取负号,(7)式取正号; $\Delta d < 0$ 时,(6)式取正号,(7)式取负号,在下面的讨论中,如果不加说明时均为 $\Delta d > 0$ 的情况。

2.2 全息图再现像的分离条件

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,则全息图上记录的最小空间频率干涉条纹产生的衍射光与 z 轴的夹角,应大于物光场最大带宽对应的夹角^[10]。在局部微小区域应用光栅方程,上述条件可以描述为

$$\frac{\lambda}{\Delta\alpha_{O\min}} 2\alpha_{O\max} = \lambda, \quad (8)$$

其中 $2\alpha_{O\max}$ 是与图1中物光场带宽对应的光线传播方向与 z 轴的夹角。将(5)式和(6)式代入(8)式,可以得到满足分离条件的点参考光源距 z 轴的最小距离为

$$x_{RO\min} = \left(\frac{3L_{\text{CCD}}/2 + 3L_o/2}{d} - \frac{L_{\text{CCD}}/2}{d + \Delta d} \right) (d + \Delta d), \quad (9)$$

对应的参物光最小夹角为

$$\Delta\alpha_{SOR\min} = \frac{L_{\text{CCD}} + L_o}{d}. \quad (10)$$

2.3 数字全息图记录的采样条件

将(9)式代入(7)式,得到满足分离条件的参物光最大夹角为($\Delta d \geq 0$)

$$\Delta\alpha_{OR\max} = \frac{2(L_{\text{CCD}} + L_o)}{d} - \frac{L_{\text{CCD}}}{d + \Delta d}, \quad (11)$$

假设 CCD 光敏面在 x 方向的像元大小为 Δx ,根据尼奎斯特(Nyquist)采样条件要求,一个条纹周期内的采样点不能低于2个,因此干涉条纹的最大空间频率应满足

$$f_{OR\max} = \frac{\Delta\alpha_{OR\max}}{\lambda} \leq \frac{1}{2\Delta x}, \quad (12)$$

结合(11)式和(12)式可得同时满足分离和采样的数字全息记录条件为

$$\Delta\alpha_{dOR\max} = \frac{2(L_{\text{CCD}} + L_o)}{d} - \frac{L_{\text{CCD}}}{d + \Delta d} \leq \frac{\lambda}{2\Delta x}, \quad (13a)$$

用同样的方法可以得到 $\Delta d < 0$ 时的记录条件为

$$\Delta\alpha_{xOR\max} = \frac{2L_o}{d} + \frac{L_{\text{CCD}}}{d + \Delta d} \leq \frac{\lambda}{2\Delta x}. \quad (13b)$$

3 几种特殊情况的讨论及比较

3.1 采样条件的讨论和应用

如(13a)式和(13b)式中 Δd 的绝对值相等,注意到当参考光至 CCD 的距离小于物体至 CCD 的距离时,由于 $|\Delta d| < d$,因此总有

$$\Delta\alpha_{dOR\max} - \Delta\alpha_{xOR\max} = -\frac{2\Delta d^2 L_{\text{CCD}}}{d(d^2 - \Delta d^2)} \leq 0, \quad (14)$$

从(14)式可以看出,参考光至 CCD 的距离大于物体至 CCD 的距离的光路结构,比参考光至 CCD 的距离小于物体至 CCD 的距离的光路结构更容易满足采样条件;另外,总是希望物体至 CCD 的距离在最低限度下满足菲涅耳近似条件,参考光至 CCD 的距离小于物体至 CCD 的距离时,容易导致菲涅耳衍射条件不满足。基于上述两个原因,实际全息图的记录一般应选择在 $\Delta d \geq 0$ 的情况下进行。

由于(13)式是在满足分离条件的情况下得到的,具有简明的物理意义:只要该式规定的参物光的最大夹角满足采样条件,数字全息图再现光场的三个部分就可以完全分离。

3.2 优化的记录光路结构

从(13)式可以看出,如果记录物体和 CCD 的尺寸固定不变,通过减小物体至 CCD 的距离 d 或物体至参考光源的距离 Δd 都可以减小参物光的最大夹角,当 $\Delta d = 0$ 时,(13)式取得最小值,将其写为

$$\Delta\alpha_{FOR} = \frac{L_{\text{CCD}} + 2L_o}{d}, \quad (15)$$

实际上, $\Delta d = 0$ 时,所记录的全息图就是无透镜傅里叶变换全息图。与(13)式比较可以看出,在满足同样的采样条件下,利用无透镜傅里叶变换全息术可以记录更大物体的数字全息图;如果记录物体不太大,则记录距离可以更近,获得更多的信息,有利于提高再现像的分辨率。

如果图1中物体在 x 方向光强和相位分布均为常数,且单位长度的辐射为1,物体上各点发出的光在 CCD 上任意一点的振幅均相等,从(2)式和图2容易得到 CCD 上任意一点物光合矢量在 z 轴和 x 轴方向的复振幅分量可以分别近似为 L_o 和 $x_{\text{CCD}}L_o/d$,该点的合矢量与 z 轴的夹角为

$$\alpha_{O\text{result}} = x_{\text{CCD}}/d, \quad (16)$$

可见,傅里叶变换全息图中参物光的干涉场,可以等效为参考光与位于 z 轴上的点物的杨氏干涉,CCD 记录面上的干涉图与两个点光源的杨氏干涉一样,仍然形成等间距的平行正弦条纹。实际上,考虑到物体的调制和散斑的影响,无透镜傅里叶变换全息图

是在散斑点上调制上近似等间距平行正弦条纹的散斑干涉场。从上面的分析可以看出:无透镜傅里叶变换全息术可以在较大的空间范围满足采样条件,同时满足分离的条件,它给数字全息的记录和再现像的分离带来许多方便。

3.3 不同光路结构参量对物体信息量记录的影响和物体尺寸的确定

当物体上各点到达 CCD 上的物光场不产生叠加时,满足分离和采样的相应数字全息记录条件直接由(13)式决定;而当物体上各点到达 CCD 上的物光场产生满足(16)式的叠加时,(13)式中的 L_o 可以等效为 0,用无透镜傅里叶变换全息术记录时($\Delta d=0$),两种情况下满足分离和采样的条件分别为

$$\lambda d/2(L_{\text{CCD}} + 2L_o) \geq \Delta x, \quad (17a)$$

$$\lambda d/2L_{\text{CCD}} \geq \Delta x, \quad (17b)$$

由(13)式可以看出,用平行光作为参考光($\Delta d = \infty$)是最不利的记录光路结构,对于物光不满足(16)式的叠加结果时,其分离和采样的记录条件可分别写为

$$\lambda d/4(L_{\text{CCD}} + L_o) \geq \Delta x, \quad (18a)$$

$$\lambda d/4L_{\text{CCD}} \geq \Delta x, \quad (18b)$$

分别比较(17a)式与(18a)式及(17b)式与(18b)式可以看出,用球面参考光波比用平面参考光波更容易满足分离和采样条件,物光在 CCD 面上的叠加有利于数字全息图的记录。在满足同样的采样条件下,当物体至 CCD 的距离一定时,无透镜傅里叶变换全息图可以记录更大的物体;当物体的尺寸一定时,用球面参考光波可以记录物体至 CCD 距离更近的数字全息图。按照数字全息分辨率的定义 $\lambda d/L_{\text{CCD}}$ ^[11],比较(17b)式与(18b)式的极端情况,无透镜傅里叶变换全息图再现像的分辨率可以比用平面参考光波的情况大一倍。

当物光产生满足(16)式的叠加结果时,直接用(13)式不能估算能够记录物体的大小,即用(13)式只能估算出满足分离和采样的距离,物体的大小已经不成限制数字全息图记录的条件。考虑到数字全息的记录是在菲涅耳近似下进行的,此时可以记录的物体的大小应由菲涅耳近似条件来估算。如果仍然按图 1 所示的记录光路来考虑,菲涅耳近似条件可以写为

$$d^3 = \frac{c}{8\lambda}(L_{\text{CCD}}/2 + L_o/2)^4, \quad (19)$$

式中 c 为足够大的常数,一般可取 10^2 量级。

4 实验及讨论

实验记录光路如图 3 所示,其中用于实验记录数字全息图的 CCD 是卸去镜头的 MTV-1802CB 摄像头,像素数为 768(H)×576(V),像素大小为 0.010 mm×0.0108 mm,数字全息图的大小为 7.68 mm×6.22 mm。准直后的 He-Ne 激光经分束镜 BS_1 后分为两束,一束经反射镜 M_1 反射后透过物体形成物光,参考光经反射镜 M_2 反射和透镜会聚,参考光和物光由分束镜 BS_2 调整后按一定夹角照射到 CCD 芯片上形成全息图。参考光路中的透镜除了用于形成球面波外,还可调节会聚点至 CCD 的距离。

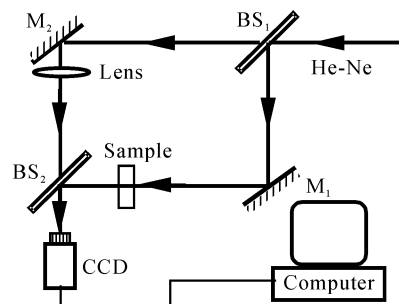


Fig. 3 Experimental configuration for recording a digital hologram by use of a spherical reference wave

记录物体分别是高度为 14.2 mm 的“马车”[图 4(a)]和高度为 7.5 mm 的“女士”[图 5(a)]平面散射图案。采用无透镜傅里叶变换全息方法记录,按(19)式估算,取“马车”至 CCD 的距离为 850 mm,“女士”至 CCD 的距离 350 mm。图 4(b)和图 5(b)分别是它们的无透镜傅里叶变换全息图,它们的条纹分布与 3.2 中的分析是一致的。直接对图 4(b)和图 5(b)进行傅里叶变换可以得到它们的数字再现光场^[9]。如图 4(c)和图 5(c)所示,它们的原始像和共轭像均对称于再现像平面的中心法线分布。从图 4(d)和图 5(d)可以看出,由于记录距离短,“女士”数字再现像中的大部分细节可以分辨,而“马车”再现像中的大部分细节都不能分辨。需要说明的是,由于两个图像的尺寸均超出了 CCD 的尺寸,如果参考光是平面波或所记录的两个图案是透明衍射物体,实验中是不能记录到同时满足采样条件和分离条件的数字全息图的。

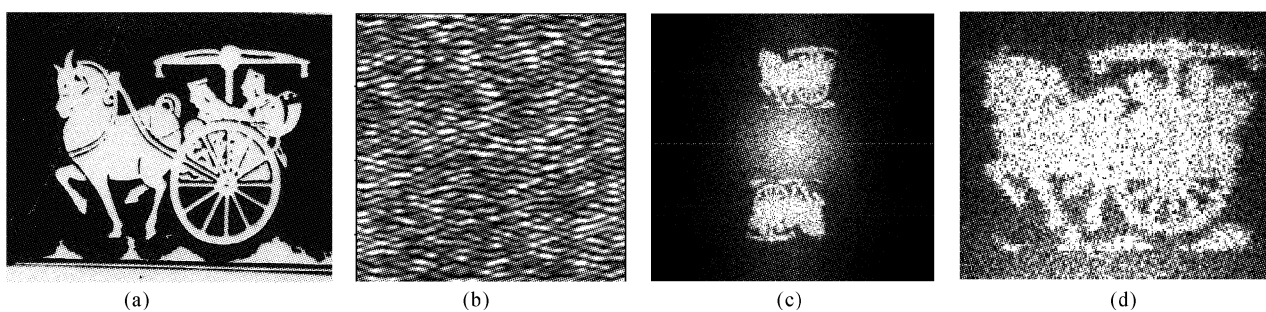


Fig. 4 (a) The original picture of "Carriage", (b) its digital hologram (partial), (c) the numerical reconstructing optical field, (d) the magnified reconstructing image

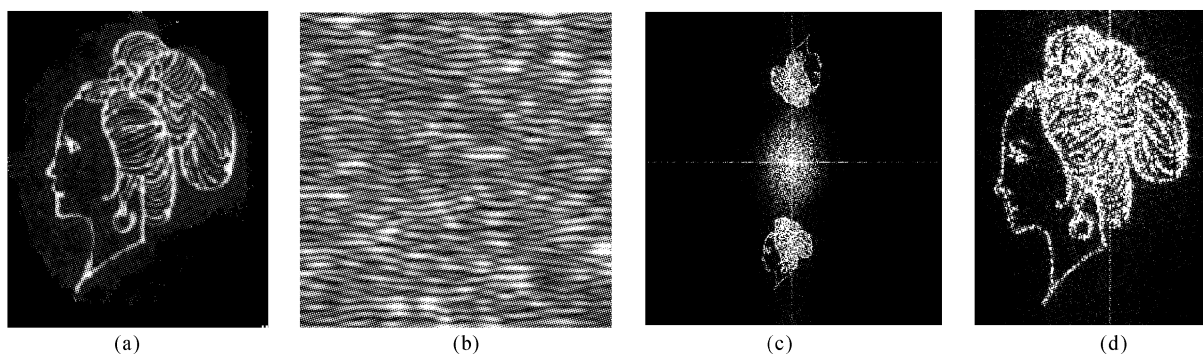


Fig. 5 (a) The original picture of "Lady", (b) its digital hologram (partial), (c) the digital reconstructing optical field, (d) the magnified reconstructing image

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, 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
- 3 Pedrini Giancarlo, Tiziani H J. Short-coherence digital microscopy by use of a lensless holographic imaging system. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22): 4489~4496
- 4 Dubois F, Monnmp O, Yourassowsky C *et al.*. Border processing in digital holography by extension of the digital hologram and reduction of the higher spatial frequencies. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(14): 2621~2626
- 5 Liu Cheng, Li Liangyu, Li Yin Zhu *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)
- 6 Zhao Jianlin, Tan Haiyun. Measuring three-dimensional temperature field by digital holographic interferometry. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(12): 1447~1451 (in Chinese)
- 7 Guo Chengshan, Wang Weitian, Li Jian *et al.*. Elimination of zero-order diffraction spot in digital reconstruction of hologram. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(8): 1073~1076 (in Chinese)
- 8 Kreis T. Frequency analysis of digital holography. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(4): 771~778 (in Chinese)
- 9 Wagner C, Seebacher S, Osten W *et al.*. Digital recording and numerical reconstruction of lensless Fourier holograms in optical metrology. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(22): 4812~4813
- 10 Francis T S Yu. *Optical Information Processing*. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1983. 376~393
- 11 Schars M, Juptner P O. Digital recording and numerical reconstruction of hologram: reduction of the spatial component. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(4): 977~982