

影响数字全息再现像像质的因素分析

金洪震, 王 辉, 邱培镇, 吴 琼
(浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

摘 要:详细地讨论了 CCD 的感光像元、抽样间隔和感光面积这三个结构参量对数字全息再现像的影响,并分析了结构参量之间的相互关系。结果表明,CCD 的三个结构参量不仅分别影响着数字全息图再现像的亮度、大小和分辨率,同时还与记录光路相关联并相互影响。在 CCD 的结构参量、物体大小及记录波长都确定的情况下,设计了最佳全息记录光路,使 CCD 的带宽得到了充分利用,获取的信息量也达到了极限。通过综合归纳,给出了充分利用 CCD 结构参量进行高质量数字全息记录的建议,并进行了实验验证。

关键词:信息光学;数字全息图;CCD 结构参量;像质

中图分类号: O438.1 **文献标识码:** A

Analysis of the influencing factors on the reconstruction image of digital holograms

JIN Hong-zhen, WANG Hui, QIU Pei-zhen, WU Qiong
(Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract: The influence of structural parameters of CCD including the size of the pixel, sampling interval and sensitive area on the reconstruction image of digital holograms is discussed, and the relations between them are analyzed. Such associating structural parameters interacting with the optical arrangement for recording the digital holograms, have influences on the brightness, the size and the resolution of the reconstruction image. Considering these influences, an optimal optical setup for recording high quality digital holograms is introduced, and corresponding experimental results are given.

Key words: information optics; digital hologram; CCD structural parameters; image quality

1 引 言

1994年, Schnars 和 Jüptner 利用电荷耦合器件 (CCD) 实现了数字全息图的记录^[1]。随着高分辨率光电成像器件以及计算机技术的进步, 数字全息术在显微技术^[2-3]、干涉计量^[4]及三维信息识别^[5]等方面有十分诱人的应用前景。数字全息记录过程中, 由于 CCD 结构参量和记录光路系统因素的影响, 传递到像方的信息量受到了限制, 因而记录的全息图再现像像质也就受到了影响。利用 CCD 记录全息图与用化学感光材料记录全息图有着本质的不同, CCD 各种参量都会影响全息图再现像的效果, 包括 CCD 的结构参量、数字化噪音、暗电流, 等等。CCD 的结构参量对数字全息的影响以及提高再现

像分辨率问题曾经有文献给以关注^[6-7], 但是没有进行详细分析。本文详细地讨论了 CCD 的感光像元、抽样间隔和感光面积这三个结构参量对数字全息再现像的影响, 并分析了它们之间的相互关系。讨论了记录光路的影响, 给出了最佳全息记录光路并进行了实验验证。

2 CCD 结构参量对数字全息再现像的影响

数字无透镜傅里叶变换全息图记录的信息量可以达到最大^[8]。设物体 $f(x_o, y_o)$ 置于物平面

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (No. Y105061) 资助。
作者简介: 金洪震 (1965 -), 男, 学士, 副教授, 研究方向为数字全息技术及光电检测。E-mail: kingh@zjnu.cn
收稿日期: 2009-05-10

(X_o, Y_o), 参考点光源位于(X_r, Y_r), 则在傅里叶变换全息的记录面上, CCD 记录的光强分布可表示为:

$$I_{ccd}(x_h, y_h) = [I(x_h, y_h) * \text{rect}(\frac{x_h}{a_x}, \frac{y_h}{a_y})] \cdot \text{comb}(\frac{x_h}{d_x}, \frac{y_h}{d_y}) \text{rect}(\frac{x_h}{L_x}, \frac{y_h}{L_y}) \quad (1)$$

其中, $I(x_h, y_h)$ 表示在 CCD 面上的干涉条纹分布; (a_x, a_y), (d_x, d_y), (L_x, L_y) 分别是 CCD 的感光像元的大小、抽样间隔和感光面积。CCD 结构示意图如图 1 所示。

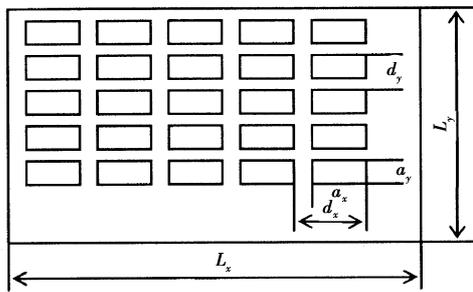


图 1 CCD 结构参量示意图

模拟光学全息再现的过程, 对 CCD 记录的全息图进行数字模拟再现, 得到的再现光场分布为:

$$g(x_i, y_i) = C\delta(x_i + X_r, y_i + Y_r) * [[F \{ I(x_h, y_h) \} \text{sinc}(\frac{a_x x_i}{\lambda z_0}, \frac{a_y y_i}{\lambda z_0})] * \text{comb}(\frac{d_x x_i}{\lambda z_0}, \frac{d_y y_i}{\lambda z_0}) * \text{sinc}(\frac{L_x x_i}{\lambda z_0}, \frac{L_y y_i}{\lambda z_0})] \quad (2)$$

式中, δ 函数是参考光的傅里叶变换; F 表示傅里叶变换; $*$ 表示卷积运算。式(2)全面地反映了 CCD 结构参量对全息图再现像的影响, 下面进行逐一分析。

2.1 CCD 像素大小对再现像的影响

假设被记录的物体呈栅状结构, CCD 感光像元对再现像的影响体现在式(2)中的:

$$g_{ccd\text{pix}}(x_i, y_i) = F \{ I_h(x_h, y_h) \} \text{sinc}(\frac{a_x x_i}{\lambda z_0}, \frac{a_y y_i}{\lambda z_0}) \quad (3)$$

为了使讨论问题简单, 设 $X_r = 0, Y_r = 0$, 则上式可展开为:

$$g_{ccd\text{pix}} [F \{ OO^* \} + I_R \delta(x_i, y_i) + f(x_i - X_o, y_i - Y_o) + f(-x_i + X_o, -y_i + Y_o)] \text{sinc}(\frac{a_x x_i}{\lambda z_0}, \frac{a_y y_i}{\lambda z_0}) \quad (4)$$

式(4)的含义可以用图 2 来说明。以一维情况进

行分析, 再现像在以下两个方面受到 $\text{sinc}(a_x x_i / \lambda z_0)$ 函数的影响。一方面, 再现像空间大小受到 $\text{sinc}(a_x x_i / \lambda z_0)$ 函数的限制, 像场最大范围为 $2\lambda z_0 / a_x$ 。根据傅里叶变换性质, 直射光的宽度是物体宽度的两倍, 假设物体在 X 方向的宽度为 W_{ox} , 当零级项和再现像恰好分离时, 像空间至少为 $4W_{ox}$, 则被记录的物体必须小于由 $\text{sinc}(a_x x_i / \lambda z_0)$ 函数限制的宽度, 在 X 方向应该满足:

$$W_{ox} \leq \lambda z_0 / 2a_x \quad (5)$$

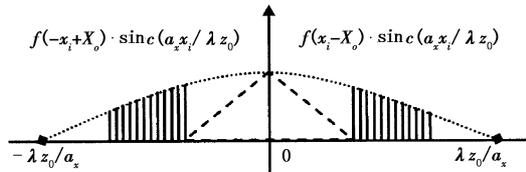


图 2 CCD 感光像元对再现像亮度的影响

另一方面, 再现像的强度也受到 $\text{sinc}(a_x x_i / \lambda z_0)$ 函数调制, 且沿着像场的中心向边缘逐渐减弱。显然, 满足式(5)大小的物体再现像的边缘光的强度将降为零。要得到亮度较为均匀的再现像, 通常将 $\text{sinc}(a_x x_i / \lambda z_0)$ 函数的截止坐标减少一半。相应地物体在 X 方向的大小取为:

$$W_{ox} \leq \lambda z_0 / 4a_x \quad (6)$$

2.2 CCD 抽样频率对再现像的影响

在式(2)中, 梳状函数 $\text{comb}(d_x x_i / \lambda z_0, d_y y_i / \lambda z_0)$ 与 $g_{ccd\text{pix}}(x_i, y_i)$ 的卷积结果形成了多重像, 如图 3(a) 所示。从图中可以得出, 当物体和参考光的设置恰好可以使零级项和再现像分离时, 同时又要使得多重像分离, 则物体宽度必须小于:

$$W_{ox} \leq \lambda z_0 / 4d_x \quad (7)$$

由于 CCD 的结构决定了 $\lambda z_0 / 4d_x < \lambda z_0 / 4a_x$, 因此取样间隔的大小对被记录物体大小的限制比像素单元大小的限制更大。式(7)是存在零级项和共轭像的情况下得出的, 若消去零级项, 像空间就扩大到如图 3(b) 所示, 能够记录的物体在 X 方向上宽度为:

$$W_{ox} \leq \lambda z_0 / 2d_x \quad (8)$$

若再消去共轭像, 像空间就进一步可以扩大, 如图 3(c) 所示。在 X 方向上宽度要求为:

$$W_{ox} \leq \lambda z_0 / d_x \quad (9)$$

虽然有多种技术可用于消除零级项和共轭像^[9-10]。要使得消除零级项和共轭像的技术产生最好效果, 必须考虑到 CCD 感光像元大小和抽样间隔之间是相互制约的, 对于仅仅消除零级项的情况,

要求 $\lambda z_0/2d_x < \lambda z_0/4a_x$ 。而对于同时消除了零级项和共轭像的情况,则要求 $\lambda z_0/d_x < \lambda z_0/4a_x$ 。

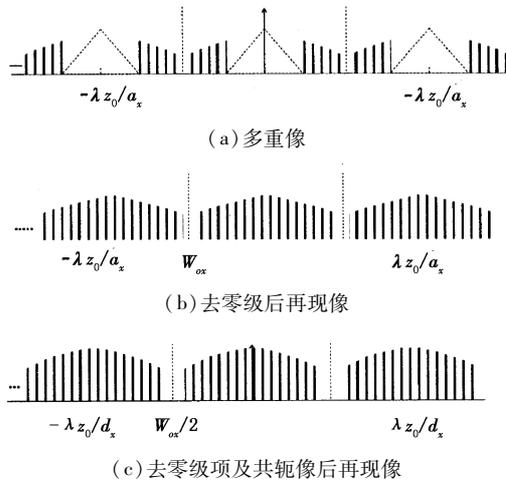


图3 抽样间隔对再现像的影响

2.3 CCD 感光面积对再现像的影响

在 CCD 的抽样间隔确定的情况下,CCD 面积大小实际上就是 CCD 的抽样点数。面积对再现像的影响由式(2)中的 $\text{sinc}(L_x x_i/\lambda z_0)$ 决定。在全息成像过程中,它起到孔径的作用,因而决定了成像的分辨率。 $\text{sinc}(L_x x_i/\lambda z_0)$ 函数对再现像的影响可用图4进行解释。由于 $\text{sinc}(L_x x_i/\lambda z_0)$ 函数达到的第一个零点的宽度为 $\lambda z_0/L_x$,它与物函数卷积的结果将使得物体的结构展宽 $2\lambda z_0/L_x$,因此,根据瑞利判据,可以分辨的物体结构间隔 d_o 必须满足 $d_o \geq \lambda z_0/L_x$ 。

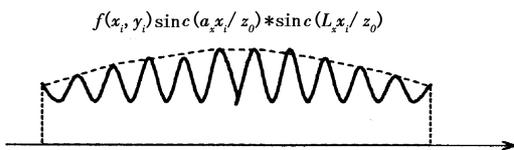


图4 CCD 感光面积的大小对再现像分辨率的影响

3 最佳全息记录光路的设计及实验

利用图5光路研究数字全息信息最佳记录条件。由图可知,物光和参考光在 CCD 面上的干涉条纹间距可表示为:

$$\delta = \frac{\lambda}{2\sin(\alpha/2)} \quad (10)$$

式中, λ 为记录光波波长; α 是参考光和物光波在 CCD 面上的夹角。以一维情况进行讨论,设物体的大小为 W_{ox} , CCD 的尺寸为 L_x , 物体与记录平面的距离是 z_0 。为了使得 CCD 能够记录到干涉条纹,期望条纹间距尽可能的大,也就是 $\sin\alpha$ 的值尽可能小。设物点位于 $(x_o, 0)$, 在全息记录平面坐标 (ξ, z_o) 处, $\sin\alpha$ 的值可以近似为:

$$\sin\alpha \approx \frac{x_o - X_r}{z_0 - z_r} - \frac{z_r}{z_0(z_0 - z_r)}(x_o - \xi) \quad (11)$$

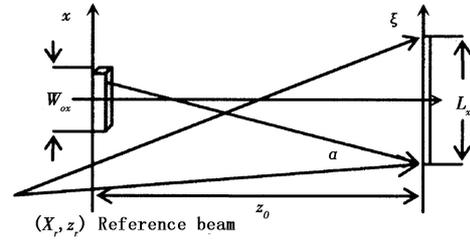


图5 参物光夹角与记录参量关系图

图5中,当 $X_r = 0$ 时,则成为同轴全息光路,由式(11)可知 $\sin\alpha$ 的值最小。在非涅耳近似下,在 CCD 上下边缘的 $\sin\alpha$ 的值可表示为:

$$\sin\alpha \approx \frac{W_{ox}/2}{z_0 - z_r} - \frac{z_r}{z_0(z_0 - z_r)}(W_{ox}/2 \mp L_x/2) \quad (12)$$

其中, $\pm L_x/2$ 分别表示 CCD 的上下边缘位置,正号为下边缘,负号为上边缘。图6给出了随着参考光位置 z_r 的变化, $\sin\alpha$ 值在 CCD 上下边缘的变化情况。从图中可以看出,随着参考点光源的位置向 CCD 移动,对于下边缘, $\sin\alpha$ 值先是变小,然后再慢慢变大;而对于上边缘, $\sin\alpha$ 值一直在变大。仅当 $z_r = 0$ 时,上下边缘对应的 $\sin\alpha$ 值一致,这正是同轴傅里叶变换全息光路,且 CCD 面上的干涉条纹密度达到最小。

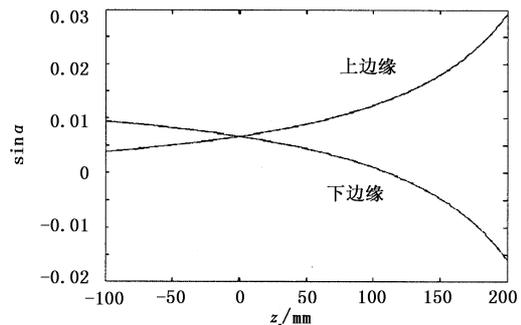


图6 同轴时 CCD 上下边缘的 $\sin\alpha$ 与 z_r 的关系
($L_x = 6.8 \text{ mm}, z_0 = 300 \text{ mm}, W_{ox} = 4 \text{ mm}$)

同轴傅里叶变换全息图可以充分地降低对记录器件分辨率的要求,同时可以利用相移技术消除零级和共轭像的干扰,再现像可以充分利用像素数,从而达到提高分辨率的目的。在 CCD 结构参量、物体大小以及记录波长都确定的情况下,可以通过改变物距 z_0 ,使 CCD 达到最高效的信息记录。在不考虑像素大小对再现像的影响下,可以推得最佳记录距离为 $z_0 = d_x W_{ox}/\lambda$,像的分辨间隔为 $d_{\text{omin}} = d_x W_{ox}/L_x$,满足了信息传递空间带宽积不变原理,CCD 分辨率被用到极限,但此时只有像的中间比较明亮。但考虑到 CCD 的实际结构,为了得到较为满意的像,按式(6)最佳物距可近似为 $z_0 = 4d_x W_{ox}/\lambda$,像的分辨间

隔为 $d_{\text{omin}} = 4d_x W_{\text{ox}} / L_x$ 。

根据以上讨论的结果,图7给出了一个最佳全息记录的实验光路。激光束经分束镜 BS1 分为两路:一路经反射镜 M2 反射,经 BE2 扩束后照射到物体上,并在物体前放置一块毛玻璃,使之产生漫射光均匀照明物体。物体经过显微物镜 MO 在直角分束棱镜 BS2 左侧平面处成一清晰放大的实像。另一路光经过相移器 PSD,扩束准直形成平行光,经反射镜 M1 反射,由透镜 L2 在直角分束棱镜上侧面汇聚形成一点光源,此点光源和物体的实像相对 CCD 面可视为在同一平面上,形成同轴傅里叶变换全息光路。

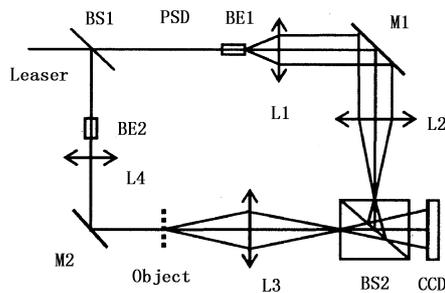
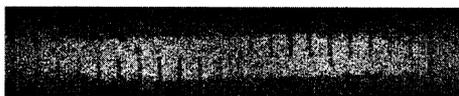


图7 同轴傅里叶数字全息图记录光路

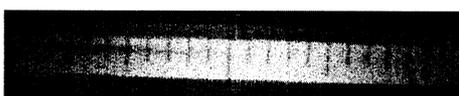
按图7光路,验证 CCD 结构参量对数字全息再现像的影响。取物距为 $z_0 = 280 \text{ mm}$, CCD 像素间距为 $d_x = 8.6 \mu\text{m}$, 记录波长为 $0.633 \mu\text{m}$ 。透明直尺作为记录物体,并在其之前放置一块毛玻璃,使之产生漫射光均匀照明物体。分别记录了离轴、同轴的无透镜傅里叶变换全息图,并进行了计算机模拟再现。图8(a)是再现像恰好完全分离时的离轴全息图重构的再现像,从图中标尺可以读出物体的宽度大约 5 cm。图8(b)是离轴全息图消除了零级像后的再现像,读出的宽度大约是 10 cm。图8(c)是同轴全息图消除了零级与共轭像后的再现像,宽度大约是 20 cm。实验结果与给定的参量按式(7)~式(9)理论计算结果基本相符。



(a) 离轴全息图再现像结果



(b) 消除零级项后离轴全息图再现像



(c) 消除零级项和共轭像后同轴全息图再现像

图8 实验结果

4 结论

CCD 的三个结构参量从不同方面影响着数字全息图的再现像像质,这种影响不是孤立的,而是相互关联的,而且还与记录波长和光路参量设置有关。感光像元的大小对再现像的亮度进行了非均匀调制,抽样间隔对再现像的大小进行限制,而感光面积的大小决定了再现像的分辨率。在不考虑像素大小对再现像的影响下,得到最佳记录距离为 $z_0 = d_x W_{\text{ox}} / \lambda$, 满足了信息传递空间带宽积不变原理, CCD 分辨率被用到极限。考虑 CCD 的实际结构时,得到最佳物距可近似为 $z_0 = 4d_x W_{\text{ox}} / \lambda$ 。实验验证了理论结果的正确性。讨论 CCD 结构参量及记录光路对数字全息再现像的影响,有益于提高再现像像质,为加速数字全息技术的实际应用做了基础工作。

参考文献:

- [1] Schnars U, Juptner W. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction [J]. Applied Optics, 1994, 33(2): 178 - 181.
- [2] 董可平, 钱晓凡, 张磊, 等. 数字全息显微术对细胞的研究[J]. 光子学报, 2007, 36(11): 2013 - 2016.
- [3] Palacios F, Palacios D, Palacios G, et al. Methods of Fourier optics in digital holographic microscopy [J]. Optics Communications, 2008, 281(4): 550 - 558.
- [4] Gombkoto B, Kornis J, Fuzessy Z. Difference displacement measurement using digital holography [J]. Optics Communication, 2002, 214(1-6): 115 - 121.
- [5] Tajahuerce E, Matoba O, Javidi B. Shift-invariant three-dimensional object recognition by means of digital holography [J]. Applied Optics, 2001, 40(23): 3877 - 3886.
- [6] 刘诚, 朱健强. 数字全息形貌测量的基本特性分析 [J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(3): 328 - 330.
- [7] 范琦, 赵建林, 向强, 等. 改善数字全息显微术的几种方法 [J]. 光电子·激光, 2005, 16(2): 226 - 230.
- [8] Gustafsson M, Sebesta M, Bengtsson B, et al. High-resolution digital transmission microscopy a Fourier holography approach [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 41(3): 553 - 563.
- [9] Herrera Ramirez J A, Garcia-Sucerquia J. Digital off-axis holography without zero-order diffraction via phase manipulation [J]. Optics Communications, 2007, 277(2): 259 - 263.
- [10] Lai S C, King B, Neifeld M A. Wave front reconstruction by means of phase-shifting digital in-line holography [J]. Optics Communications, 2000, 173(1-6): 155 - 160.