

# 一种提高数字全息再现像质量的方法

王艳萍,吕晓旭,钟丽云,罗印龙

(昆明理工大学理学院,云南昆明 650093)

**摘要:**针对数字全息中零级像和共轭像的存在影响数字再现像的质量这一问题,采用四步相移方法,对离轴数字全息图采用相加运算处理,能较好地去除零级像及共轭像,提高了信噪比,从而提高了再现像质量.

**关键词:**数字全息;离轴全息;相移

**中图分类号:** TB877 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2005)01-0108-03

## A Method of Enhancing the Quality of Reconstructed Image in Digital Holography

WANG Yan-ping, LV Xiao-xu, ZHONG Li-yun

(Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** Aiming at the question that the existence of zero-order image and conjugate image has certain effect on the quality of reconstructed images in digital holography, a method of four-step phase-shifting digital holography is presented, in which four phase-shifting off-axis digital holograms are made to add operation, and zero-order image and conjugate image are preferably eliminated. Not only is the signal-noise ratio improved, but also the quality of reconstructed images is enhanced.

**Key words:** digital holography; off-axis holography; phase-shifting

### 0 引言

数字全息技术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.与传统的全息相比,数字全息有着自身的优点:省去了化学处理的过程,记录和再现过程都要比普通全息方便快捷,既增加了全息的灵活性,也提高了制作全息图的速度;成像的位置可以自由调整,不需要进行复杂的机械调焦;能够记录运动物体的各个瞬时状态.数字全息术的应用涉及范围非常广泛,除了变形测量<sup>[1]</sup>、振动测量<sup>[2]</sup>等应用外,还被广泛运用于光纤<sup>[3]</sup>和生物细胞<sup>[4]</sup>等微观测量领域,有着重要的意义.

由于数字全息是以数字技术进行图像再现,再现结果直接显示在计算机屏幕上,所以屏幕上同时存在零级像、共轭像和真实像,这三束光线中除真实像以外,其他两者都是以杂散光形式出现,且扩展范围很宽,二者的存在对再现像的分辨率造成很大影响,特别是零级像,由于占据了大部分能量而在图像的当中形成一个又大又亮的亮斑,当再现图像在屏幕显示时造成真实像暗淡致使细节难以分辨.另一方面,由于在数字全息中,用于记录全息图的 CCD 光敏面尺寸小,分辨率低,使得记录数字全息图的角度限制在很小的范围内,约为 2°以内,所以一旦记录角度很小时,即接近于同轴全息,很容易造成三个再现像重叠在一起,无法分开.即使在离轴全息中,当再现距离很近时也会出现这种现象.因此,将零级像和共轭像去除,数字全息的分辨率将会有大幅度提高,应用范围也会相应扩大.采用四步相移方法,对四幅离轴全息图通过相加运算,将零级像及共轭像去除,不仅提高了数字全息图的信噪比,而且提高了再现像质量.

收稿日期:2004-02-25. 基金项目:云南省自然科学基金资助项目(项目编号:2001F0026M、2002F0030M).

第一作者简介:王艳萍(1977~),女,在读硕士研究生.主要研究方向:光学全息及数字全息. E-mail: pinger721@yahoo.com.cn

### 1 基本原理

图 1 为数字全息记录与再现光路示意图,其中  $R_1$  与  $R_2$  是以平面波作为参考光时,记录参考光  $R_1$  与再现参考光  $R_2$  分别与 CCD 法线的夹角,  $d$  是物体至 CCD 的距离,  $d_r$  是 CCD 到再现像面之间的距离. 设传播到记录介质上的物光波波前为  $O(x, y)$ , 参考光波前为  $R(x, y)$ , 则被记录的全息图的总光强为

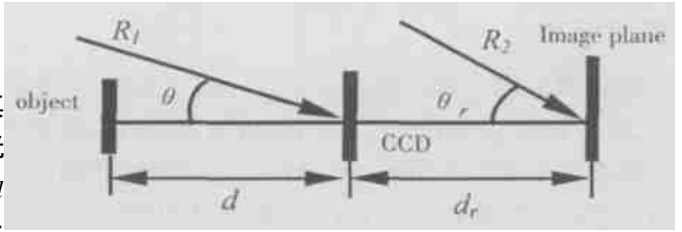


图 1 数字全息记录与再现光路示意图  
Fig. 1 Scheme for recording and reconstructing of a digital hologram

$$I_H(x, y) = |R|^2 + |O|^2 + R^*O + RO^* \tag{1}$$

假设全息图经数字化后离散为  $N_x \times N_y$  个点,记录全息图的 CCD 光敏面尺寸为  $L_x \times L_y$ ,空间采样后记录的数字全息图可表示为

$$I_H(k, l) = I_H(x, y) \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right) \times \sum_k \sum_l^{N_x, N_y} (x - k, y - l) \tag{2}$$

其中,  $k$  和  $l$  是整数 ( $-N_x/2 \leq k \leq N_x/2, -N_y/2 \leq l \leq N_y/2$ ),  $x$  和  $y$  表示全息图平面上的采样间隔,其中  $x = L_x/N_x, y = L_y/N_y$ .

在数字全息术中,其数字再现波前为<sup>[5]</sup>:

$$I_D(k, l) = R_D(k, l) I_H(k, l) = R_D |R|^2 + R_D |O|^2 + R_D R^*O + R_D R O^* \tag{3}$$

其中,  $R_D$  是用计算机模拟的数字平面再现光波,且有:

$$R_D(k, l) = A_R \exp[i\frac{2\pi}{\lambda}(kx + ly)] \tag{4}$$

(3) 式中第一项及第二项为直透光部分,再现了零级像,第三项再现了共轭像,第四项再现了实像.在对单幅数字全息图进行再现时,这三个像总是同时存在的.

当采用四步相移法时,即每步参考光相位改变  $\pi/2$ ,四个参考光波分别为:

$$\begin{aligned} R_1 &= \exp(i0) R(x, y), R_2 = \exp(i\pi/2) R(x, y) = iR(x, y) \\ R_3 &= \exp(i\pi) R(x, y) = -R(x, y), R_4 = \exp(i3\pi/2) R(x, y) = -iR(x, y) \end{aligned} \tag{5}$$

记录的四幅相应的全息图光强分别为:

$$I_1(x, y) = |R|^2 + |O|^2 + R_1^*O + R_1O^* \tag{6}$$

$$I_2(x, y) = |R|^2 + |O|^2 + R_2^*O + R_2O^* \tag{7}$$

$$I_3(x, y) = |R|^2 + |O|^2 + R_3^*O + R_3O^* \tag{8}$$

$$I_4(x, y) = |R|^2 + |O|^2 + R_4^*O + R_4O^* \tag{9}$$

将上面四式与其相对应的参考光分别相乘后进行相加运算,得到:

$$W(x, y) = R_1I_1(x, y) + R_2I_2(x, y) + R_3I_3(x, y) + R_4I_4(x, y) = 4|R|^2O \tag{10}$$

由(10)式可看出:零级像及共轭像部分已被消除,剩下的部分与原始物光波前成正比.当对其进行再现时,只有原始物光波前被再现,即再现出来的就只有实像.其再现原理与单幅数字全息图的再现原理相同.

设全息面为  $xy$  平面,在距离全息面  $d_r$  的观察平面上,当

$$d_r^3 \gg \frac{1}{4}[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]^2 \tag{11}$$

时,其再现的波前可以利用菲涅尔积分求出:

$$U(x, y) = \frac{i}{d_r} \exp[-\frac{i}{d_r}(x^2 + y^2)] \times \int \int W(x, y) \exp[-\frac{i}{d_r}(x^2 + y^2)] \times \exp[\frac{i2}{d_r}(x + y)] dx dy \quad (12)$$

## 2 实验结果

实验所采用的光路如图2所示. 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  $512 \times 512$ , 像素大小为  $0.01 \text{ mm} \times 0.01 \text{ mm}$ , 被记录的物体是“矩形框”的黑白胶片, 物体中心位于 CCD 的中心法线上, 记录距离  $d$  与再现距离  $d_r$  均为  $300 \text{ mm}$ . 从 He-Ne 激光器发出的光经准直后由分束镜  $BS_1$  分为两束, 一束通过反射镜  $M_1$  反射后直接照射到物体上作为物光, 而另一束则通过固定在 PZT 上的反射镜  $M_2$  反射作为参考光, 两束光在分束镜  $BS_2$  上进行干涉, 最后通过 CCD 图象采集系统记录数字全息图. 其中, Computer 用于产生四步相移驱动信号和控制 CCD 同时采集相移数字全息图. 相移装置由压电陶瓷 PZT 及其固定在它上面的反射镜  $M_2$  组成, 当 Computer 发出四步相移驱动信号到 PZT 上, 由于 PZT 的电致伸缩特性带动  $M_2$  转动, 从而改变参考光的相位来实现相移. 实验中记录与再现所用参考光波均为波长为  $632.8 \text{ nm}$  的平面波.

图3是单幅数字全息图再现与相移数字全息再现结果比较, 从未相移时的数字全息图3(a)的再现像图3(b)中可看出, 再现像中包括零级像、共轭像及再现实像三个部分, 并且这三个像已大部分重叠在一起, 无法分离. 尤其是零级像, 占据了很大的空间并向两边扩展, 使得实像模糊难辨, 对再现像的质量造成很大的影响. 图3(e)是经过相移相加后的全息图3(d)的数字再现像, 显然, 零级像与共轭像已经被去除, 全息图的信噪比有了很大提高, 再现实像非常清晰.

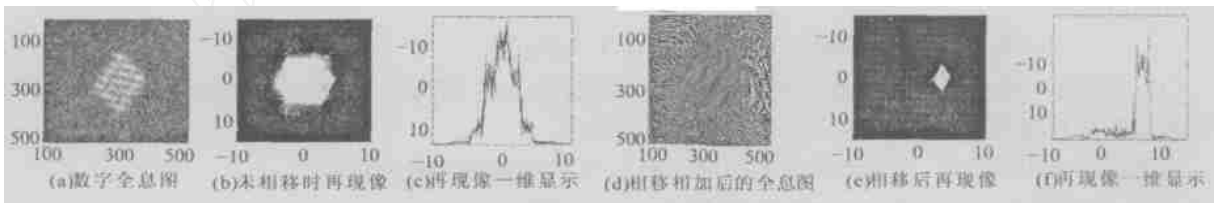


图3 单幅数字全息图再现与相移数字全息再现结果比较

Fig. 3 Comparison between the reconstruction of a digital hologram and that of phaseshifting digital hologram

## 3 结论

针对离轴数字全息再现中零级像及共轭像对再现像质量的影响问题, 采用四步相移方法, 将零级像及共轭像去除, 并且去除效果更佳, 提高了再现像的质量. 虽然在相移过程中由于环境等因素的影响, 条纹有一些抖动, 但对于数字全息来说, 这样的抖动对再现结果的影响并不大.

### 参考文献:

- [1] Pedrini G, Tiziani H J. Pulsed Digital Holographic Interferometry with 694 - and 347 - nm Wavelengths[J]. Appl. Opt., 2000, 39(2): 246 ~ 249.
- [2] Froning P, Pedrini G, Tiziani H J et al.. Vibration Mode Separation of Transient Phenomena Using Multi - pulse Digital Holography[J]. Opt. Engng. 1999, 38(12): 2062 ~ 2068.
- [3] Schedin S, Pedrini G, Tiziani H J et al.. Simultaneous Three - dimension Dynamic Deformation Measurements with Pulsed Digital Holography[J]. Appl. Opt. 1999, 38(34): 7056 ~ 7062.
- [4] Ulf Schnars. Direct Phase Determination in Hologram Interferometry with Use of Digitally Recorded Holograms[J]. Opt. Soc. Am. A, 1994, 11(7): 2011 ~ 2015.
- [5] Etienne Cuhe, Christian Dipeursinge. Digital Holography for Quantitative Phase - Contrast Imaging[J]. Opt. Lett. 1999, 24(5): 291 ~ 293.