

文章编号: 1001-3806(2008)02-0131-03

## 数字全息显微中的准直光再现

王华英<sup>1,3</sup>, 王广俊<sup>1,2</sup>, 谢建军<sup>1</sup>, 赵洁<sup>1</sup>, 王大勇<sup>1\*</sup>

(1. 北京工业大学 应用数理学院, 北京 100022; 2. 河南省计量科学研究所, 郑州 450008; 3. 河北工程大学 理学院, 邯郸 056038)

**摘要:** 为了准确重建微小物体三维物场, 采用理论分析与计算机模拟相结合的方法, 研究了如何用准直光重建大数值孔径数字全息图, 分析了用球面参考光波再现失效的原因, 得到了位相重建的表达式; 分析了由于记录距离和参考点源偏置的测量误差而导致位相重建像的畸变, 作了计算机模拟验证。结果表明, 对于强度重建, 只要能够记录高质量的全息图, 就可以得到准确的再现结果; 而对于三维物场重建, 只有准确测量记录距离和参考点源的偏置, 才能得到准确的再现结果; 由于距离的测量误差, 导致再现光波场的位相分布出现了二次函数调制畸变, 因此, 实验过程中精确测量这两个参量是至关重要的。

**关键词:** 全息; 数字全息显微; 三维重建; 准直光

**中图分类号:** TB877 **文献标识码:** A

### Reconstruction with collimating reference wave in digital holography microscopy

WANG Hua-ying<sup>1,3</sup>, WANG Guang-jun<sup>1,2</sup>, XIE Jian-jun<sup>1</sup>, ZHAO Jie<sup>1</sup>, WANG Da-yong<sup>1</sup>

(1. College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Henan Institute of Metrology, Zhengzhou 450008, China; 3. College of Science, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract** In order to reconstruct three-dimensional micro-object wave field accurately, the reconstruction method with collimating reference wave to reconstruct digital hologram with large numerical aperture was studied by using Fresnel diffraction formula and sampling theorem. The reason that spherical reference wave can't be used to reconstruct a large numerical aperture hologram was analyzed. The expression of reconstructed phase image was presented. As a result of the measure error of the recording distance and the offset of the point source, the distortion of the phase image reconstructed with collimating reference wave was also analyzed. Both theoretical analysis and computer simulation show that accurate intensity reconstruction can be obtained as long as a high quality hologram is recorded. Only if the recording distance and the offset of the point source are accurately measured, the correct phase reconstruction can be obtained. Due to a measure error, a quadratic function distortion of the reconstructed phase distribution appears. So it is important to measure the recording parameters accurately in experiment.

**Key words** holography; digital holographic microscopy; three-dimensional reconstruction; collimate wave

## 引 言

数字全息技术的优点包括: 测量的非破坏性、高灵敏性和高准确性; 可以同时得到亮度和位相信息, 实现三维成像; 数字全息图存储、再现和传输的方便性、灵活性。这些优势已经使数字全息技术成为近年来国内外研究的热点。目前, 在世界范围内展开了在振动分

析、形貌和变形测量、粒度分析以及微电路检测、生物细胞观测等显微方面的实验研究, 并已取得了较大进展<sup>[1-9]</sup>。随着计算机技术和 CCD 技术的进一步发展, 数字全息技术一定能在更为广泛的领域里发挥其作用。

与传统全息相比, 由于 CCD 的空间分辨率低, 因而降低了数字全息的成像分辨率, 限制了其应用范围。研究数字全息图的记录和再现技术, 获得高质量的再现像, 成为目前数字全息技术的主要任务。离轴及同轴无透镜傅里叶变换全息记录光路能够在记录面上得到近似平行等间距的干涉条纹, 从而充分利用 CCD 的全部带宽, 因此, 被广泛应用于数字全息显微领域。显微成像要求很大的数值孔径, 这种情况下用同轴球面参考光波再现, 将导致抽样定理被破坏, 产生很大的再现误差<sup>[7]</sup>。为此, 本文中研究了利用准直光波再现无

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60577029); 北京市委组织部优秀人才培养资助项目 (20051D0501523); 北京市留学人员科技活动择优资助项目

作者简介: 王华英 (1963-), 女, 博士研究生, 研究方向为光学信息处理与数字全息技术。

\* 通讯联系人。E-mail: wdyong@bjut.edu.cn

收稿日期: 2006-12-25; 收到修改稿日期: 2007-06-04

透镜傅里叶变换全息图的方法和特点,并作了计算机模拟验证。

## 1 全息图的记录与再现

数字离轴无透镜傅里叶变换记录光路如图 1 所示。由激光器发出的激光经过分束器 BS<sub>1</sub> 分为两束,

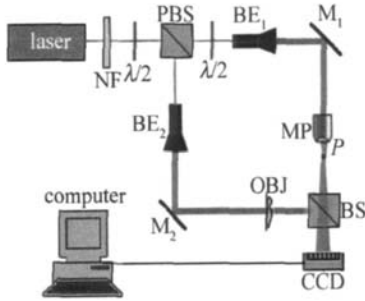


Fig 1 Optical setup for recording digital off axis lensless Fourier transform holograms NF—neutral filter glass  $\lambda/2$ —halfwave plate; PBS—polarized beam splitter prism; BE—beam expander M—mirror MP—microscope objective and pinhole BS—beam splitter cube; OBJ—object

分别经扩束准直系统 BE<sub>1</sub> 和 BE<sub>2</sub> 后,一束用来照射物体,另一束经加有针孔的显微物镜 MP 会聚于 P 点作为记录参考点源,要求 P 点到 BS 的距离等于被测物体到 BS 的距离。

以下分析中所用的坐标系为<sup>[10]</sup>:  $x_0-y_0$  为物平面,  $x-y$  为全息图平面,  $x_i-y_i$  为像平面,  $z$  轴通过此 3 个平面中心,记录距离为  $z_0$ ,再现距离为  $z$ ,参考点源坐标为  $(x_0-x_r, y_0-y_r)$ ,位于物平面。若用  $u(x, y)$  和  $r(x, y)$  分别表示全息图平面上的物光波和参考光波分布,则全息图平面上干涉光强度分布为:

$$I(x, y) = |u + r|^2 = |u|^2 + |r|^2 + ur^* + ru^* \quad (1)$$

由全息原理和菲涅耳衍射公式,重建像光场的复振幅分布为<sup>[10,11]</sup>:

$$U_i(x_i, y_i) = \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda z_i}(x_i^2 + y_i^2)\right] \times \mathcal{F}\left\{C(x, y)I(x, y) \exp\left[-\frac{j\pi}{2z_i}(x^2 + y^2)\right]\right\} \quad (2)$$

式中,  $k$  为波数,  $C(x, y)$  为再现光波,利用位于  $z$  轴上且距离 CCD 平面为  $z_0$  处的会聚球面光波再现时,二次位相因子可以消去,从而在  $z_i = -z_0$  处得到对称分布的实原始像和实共轭像。然而,在数字全息显微中,记录距离很小,球面参考光波在全息图两个相邻像素之间引起的位相差超过了  $\pi$ 。考虑如下的一个实际情况: CCD 像素数  $1024 \times 1024$  像元尺寸  $\Delta x = 6.8 \mu\text{m}$ ,参考光波长  $\lambda = 632.8 \text{nm}$ ,再现距离  $z_0 = 20 \text{mm}$ ,则球面光波在全息图边缘两个相邻像元之间的位相差为:  $\frac{2\pi}{\lambda}[(512 \times \Delta x)^2 + z_0^2]^{1/2} - \frac{2\pi}{\lambda}[(511 \times \Delta x)^2 + z_0^2]^{1/2} = 3.68\pi$ 。若数值模拟这样的参考光进行再现,抽样定

理将被破坏,像光场不能准确再现。

若用准直光再现,  $C(x, y) = 1$ ,由 (2) 式知,只有令  $z_i = -\infty$ ,才可消去二次位相因子,得到清晰的再现像。在传统光学全息中,为了使像成在有限远处,将一凸透镜紧贴全息图后放置,然后用准直光再现,即可在透镜的后焦面上得到对称的实原始像和实共轭像。

根据透镜的傅里叶变换性质,在数字全息中上述再现过程将变得极为简单,相当于用一个焦距为  $z_0$  的凸透镜对全息图强度进行傅里叶变换,并乘以一个二次位相因子,即可得到如下像光场:

$$U_i(x_i, y_i) = \exp\left[\frac{j\pi}{2z_0}(x_i^2 + y_i^2)\right] \mathcal{F}\{I(x, y)\} \quad (3)$$

可见,用会聚球面光波和用准直光波再现无透镜傅里叶变换全息图,得到的像光场强度分布均等于全息图强度的傅里叶变换。

为了测量物体的形貌,需要得到像光场的位相分布。将 (1) 式中的第 3 项  $ur^*$  代入 (3) 式,并经过简化后得到实原始像的像光场分布:

$$U_{i+1}(x_i, y_i) = \exp\left[\frac{j\pi}{2z_0}(x_i^2 + y_i^2)\right] J_{i+1}(x_i, y_i) \quad (4)$$

$$J_{i+1}(x_i, y_i) = \mathcal{F}\{ur^*\} = R_0 \exp\left[-\frac{j\pi}{2z_0}(x_r^2 + y_r^2)\right] \times \iint_{-\infty}^{\infty} \iint_{-\infty}^{\infty} \left\{ \exp\left[-\frac{j\pi}{z_0}[(x_0-x_r+x_i)x + (y_0-y_r+y_i)y]\right] \right\} dx dy \times o(x_0, y_0) \exp\left[\frac{j\pi}{2z_0}(x_0^2 + y_0^2)\right] \} dx_0 dy_0 = (\lambda z_0)^2 R_0 \times o(x_r - x_i, y_r - y_i) \exp\left[\frac{j\pi}{2z_0}(x_i^2 + y_i^2 - 2x_i x_r - 2y_i y_r)\right] \quad (5)$$

可见,由全息图傅里叶变换重建得到的原始像光场发生了二次位相畸变,位相重建时只要以  $J_{i+1}(x_i, y_i)$  除以 (4) 式中的指数函数因子,即可得到真实的像光场分布。由此可计算出位相分布为:

$$\Phi_{i+1}(x_i, y_i) = \arctan \frac{\text{Im}[o(x_r - x_i, y_r - y_i)]}{\text{Re}[o(x_r - x_i, y_r - y_i)]} \quad (6)$$

同理,可得到实共轭像光场的复振幅:

$$J_{i-1}(x_i, y_i) = \mathcal{F}\{u^* r\} = (\lambda z_0)^2 R_0 o^*(x_r + x_i, y_r + y_i) \times \exp\left[-\frac{j\pi}{2z_0}(x_i^2 + y_i^2 + 2x_i x_r + 2y_i y_r)\right] \quad (7)$$

(7) 式说明了共轭像光场也发生了二次位相畸变。校正后同样可得到其准确的位相分布。

为了得到被测物体的形貌,只要测量出记录距离  $z_0$  和参考点源的偏置参数  $x_r$  和  $y_r$ ,代入 (5) 式 ~ (7) 式即可得到像光场的复振幅分布。设相应的实际测量距离分别为  $z_c$ ,  $x_c$  和  $y_c$ ,则实际得到的实原始像和共轭像的位相分布与理论值之间分别有如下的差异:

$$\Delta\Phi_{i \pm}(x_i, y_i) = \pm \frac{k}{2} \left[ \frac{1}{z_c} - \frac{1}{z_0} \right] (x_i^2 + y_i^2) + k \left[ \left( \frac{x_c}{z_c} - \frac{x_r}{z_0} \right) x_i + \left( \frac{y_c}{z_c} - \frac{y_r}{z_0} \right) y_i \right] \quad (8)$$

可见,重建像光场的位相受到了一个二次函数的调制,物体的形貌发生了弯曲变形。在数字全息显微中,由于记录距离和点源偏置距离极小,因此必须严格控制距离的测量误差,否则将会引起较大的重建误差。

### 2 计算机模拟

作为模拟,为省去相位解包裹的麻烦,构造了特殊的三维微小物体,即在灰度为 1 的正方形平面物体上方一定高度处平行叠放一个雪花图案,二者之间的位相差为  $\pi/2$ 。模拟参数:  $N_x = N_y = 512$ ,  $\Delta x = \Delta y = 6.8 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 632.8 \text{nm}$ , 物体横向尺寸为  $0.5 \text{mm} \times 0.5 \text{mm}$ , 记录光路见图 1, 记录距离均为所允许的最小距离。

图 2 表示大小为  $0.5 \text{mm}$  的物体由准直光再现的结果,相应的记录距离为  $21.47 \text{mm}$ 。其中图 2a 表示二维强度分布;图 2b 为实共轭像的二维位相分布;图 2c 和图 2d 为相应于图 2b 的三维分布,二者的区别仅在

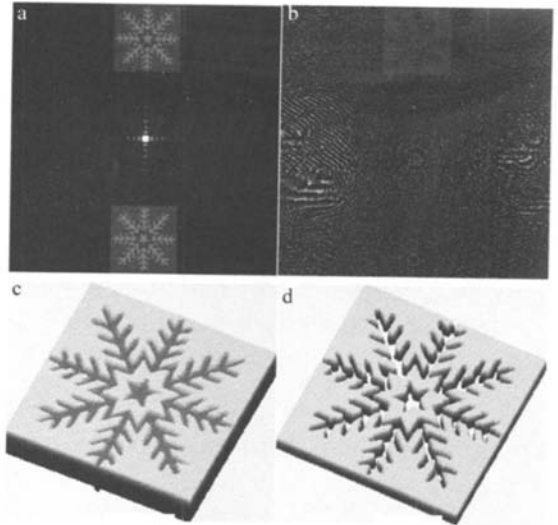


Fig 2 Optical wave field distribution of the image reconstructed with collimated reference wave  
a-2-D intensity b-2-D phase c-d-3-D intensity

于显示效果不同。利用会聚球面光波再现的结果完全一样。可见,无论是二维还是三维像都得到了清晰、准确的再现。

图 3 中给出了同一物体在再现距离不等于记录距

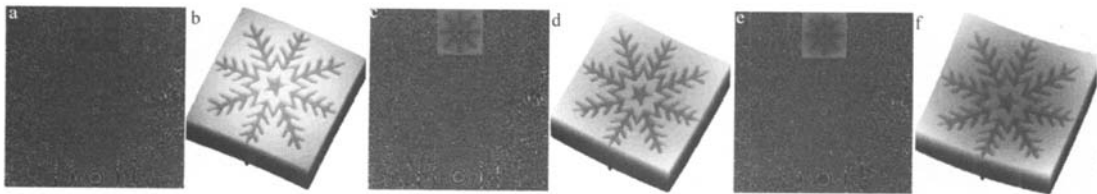


Fig 3 2-D and 3-D phase distribution of the image reconstructed with spherical reference wave  
a c e-2-D distribution b d f-3-D distribution

离情况下得到的实共轭像的重建结果。其中图 3a 图 3b 分别表示再现距离大于记录距离  $0.5 \text{mm}$  时的二维及三维分布;图 3c 图 3d 和图 3e 图 3f 分别表示再现距离小于记录距离  $0.5 \text{mm}$  和  $1 \text{mm}$  情况下相应的结果。可以看到,由位相重建得到的三维像发生了二次曲面弯曲畸变,形貌测量产生了较大的误差,与理论分析相一致。

### 3 结论

根据菲涅耳衍射理论,分析了无透镜傅里叶变换全息利用准直光波重建的方法,并对像光场的位相畸变进行了研究,由全息图的傅里叶变换直接得到的像光场发生了二次位相畸变,只要据此加以修正即可得到准确的位相再现像。对于小物场、大孔径数字全息显微来说,测量距离的微小偏差将会给位相重建带来较大的误差。虽然利用参考文献 [12] 中介绍的调焦判断方法可以对再现距离进行调整,但是此方法对于

无透镜傅里叶变换全息是无效的,因为强度再现像与再现距离无关。

总之,理论分析和计算机模拟均表明:对于数字全息三维物场重建来说,准直光再现不仅方便快捷,而且测量准确性高。此外,利用准直光再现,还可以通过简单的数字方法,在任意距离处得到聚焦的再现像,以实现大纵深物体的重建<sup>[7]</sup>。对于数字全息显微来说,国内报道的文献中一般只给出强度再现像,三维再现报道很少,因此,本文中的研究结果对实际测量有很重要的指导意义。

#### 参 考 文 献

[ 1 ] WAGNER C, SEEACHER S, OSTEN W, *et al* Digital recording and numerical reconstruction of lensless Fourier holograms in optical metrology [ J ]. *Appl Opt* 1999 28(22): 4812-4819.  
[ 2 ] DIRKSEN D, DROSTE H, KEMPER B, *et al* Lensless Fourier holography for digital holographic interferometry on biological samples [ J ]. *Optics & Lasers in Engineering* 2001 36(3): 241-249

常组织和恶性肿瘤组织中的金属元素含量明显不同。

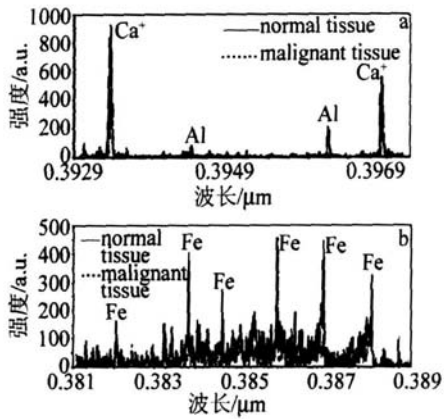


Fig 4 正常组织与肿瘤组织的 LIBS谱比较

### 3 结束语

总之, LIBS技术是一种先进的元素分析技术, 经过 40多年的发展, LIBS技术已经获得了长足发展和广泛应用, 目前 LIBS仪器在国外已实现商业化生产。相信随着激光技术的发展以及检测技术的改进, LIBS在生物医学方面将会展示出更加诱人的应用前景。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] RADZIEMSKI L, CREMERS D A. Laser induced breakdown spectroscopy: principles, applications and instruments [ J ]. SPIE, 1990, 1318: 71-75.
- [ 2 ] RUSAK D A, CASTLE B C, SMITH B W, *et al*. Recent trends and the future of laser induced plasma spectroscopy [ J ]. Trends in Analytical Chemistry, 1998, 17( 8 ): 453-461.
- [ 3 ] YU L Y, LU J D, ZHANG J *et al*. Overview of laser induced breakdown spectroscopy [ J ]. Laser Technology, 2004, 28( 1 ): 103-107( in Chinese ).
- [ 4 ] FORTES F J, CORTES M, SM'ON M D, *et al*. Chronocultural sorting of archaeological bronze objects using laser induced breakdown spectrometry [ J ]. Analytica Chimica Acta, 2005, 554( 1/2 ): 136-143.
- [ 5 ] WANG H Z. Metallurgical analysis forward position [ M ]. Beijing Science Press, 2004, 256-257( in Chinese ).
- [ 6 ] SAMEK O, LIKA M, KAISER J *et al*. Laser ablation for mineral analysis in the human body: integration of LIFS with LIBS [ J ]. SPIE, 1998, 3570: 263-271.
- [ 7 ] MICHELA C, GABRIELE C, MONTSERRAT H, *et al*. Application of laser induced breakdown spectroscopy technique to hair tissue mineral analysis [ J ]. Appl Opt, 2003, 42( 30 ): 6133-6137.
- [ 8 ] SUN Q, TRAN M, SMITH B W, *et al*. Zinc analysis in human skin by laser induced-breakdown spectroscopy [ J ]. Talanta, 2000, 52( 2 ): 293-300.
- [ 9 ] SAMEK O, BEDDOWS D C, TELLE H H, *et al*. Quantitative laser induced breakdown spectroscopy analysis of calcified tissue samples [ J ]. Spectrochimica Acta Part B, 2001, 56( 6 ): 865-875.
- [ 10 ] D'KON P B, HAHN D W. Feasibility of detection and identification of individual bioaerosols using laser induced breakdown spectroscopy [ J ]. Analytica Chimica Acta, 2005, 77( 2 ): 631-638.
- [ 11 ] MATTHEU B, LAURENT G, JIN Y, *et al*. Spectral signature of iractive CN bonds for bacterium detection and identification using femtosecond laser induced breakdown spectroscopy [ J ]. A P L, 2006, 88( 6 ): 063901( 1-3 ).
- [ 12 ] MATTHEU B, LAURENT G, JIN Y, *et al*. Femtosecond time-resolved laser induced breakdown spectroscopy for detection and identification of bacteria: A comparison to the nanosecond regime [ J ]. J A P, 2006, 99( 8 ): 084701( 1-9 ).
- [ 13 ] KUMAR A, YUEH F U, SINGH J P, *et al*. Characterization of malignant tissue cells by laser induced breakdown spectroscopy [ J ]. Appl Opt, 2004, 43( 28 ): 5399-5403.
- [ 14 ] KUMAR A, SHARMA P C. Uses of LIBS technology in biological media [ J ]. Proc SPIE, 2006, 6377: 11-17.

(上接第 133 页)

- [ 3 ] LÜQ N, GE B Z, ZHANG Y M, *et al*. Progress of studies on digital holography and its application in particle field [ J ]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2002, 13( 10 ): 1087-1091( in Chinese ).
- [ 4 ] GUSTAFSSON M, SEBESTA M, BENGTSSON B *et al*. High resolution digital transmission microscopy—a Fourier holography approach [ J ]. Optics & Lasers in Engineering, 2004, 41( 3 ): 553-563.
- [ 5 ] NOVAK E. MEMS metrology techniques [ J ]. SPIE, 2005, 5716: 173-181.
- [ 6 ] FAN Q, ZHAO J L, XIANG Q, *et al*. Methods of improving resolution of digital holography [ J ]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2005, 16( 2 ): 226-230( in Chinese ).
- [ 7 ] PEDRINI G, FRONING P, TINIANEH J *et al*. Shape measurement of microscopic structure using digital hologram [ J ]. Opt Commun, 1999, 164: 257-268.
- [ 8 ] LÜQ N, GE B Z, ZHANG Y M. Analysis of the influence factors of the reconstructed image quality in digital holography [ J ]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2005, 16( 1 ): 83-88( in Chinese ).
- [ 9 ] YUAN C J, ZHONG L Y, WANG Y P, *et al*. The analysis of offaxis digital holographic recording conditions [ J ]. Laser Technology, 2004, 28( 5 ): 482-485( in Chinese ).
- [ 10 ] WANG H Y, WANG D Y, XIE J J *et al*. Study of the reconstructing methods of the digital offaxis lensless Fourier transform hologram [ J ]. Laser Technology, 2007, 31( 3 ): 288-290( in Chinese ).
- [ 11 ] WANG H Y, WANG D Y, XIE J J *et al*. Recording conditions of digital holography [ J ]. SPIE, 2007, 6279: 62791J( 1-10 ).
- [ 12 ] GUO Y Z, QIU Z M, LIX, *et al*. A method of tuning focus for image measurement technology [ J ]. Journal of Xian University of Technology, 2001, 17( 1 ): 40-42( in Chinese ).