

# 数字全息技术的原理和应用\*

郑德香 张岩<sup>†</sup> 沈京玲 张存林

(首都师范大学物理系 北京 100037)

**摘要** 数字全息是随着现代计算机和 CCD 技术发展而产生的一种新的全息成像技术. 文章主要介绍数字全息技术的基本原理, 数字全息重建中的主要方法以及数字全息技术以其独特的优点在各个领域中的应用.

**关键词** 数字全息, 图像重建, 微结构检测

## Principle and applications of digital holography

ZHENG De-Xiang ZHANG Yan<sup>†</sup> SHEN Jing-Ling ZHANG Cun-Lin

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

**Abstract** Digital holography, a new imaging technology, has been introduced through the development of computers and CCD technology. We briefly review the basic principle of digital holography, methods of holographic reconstruction, and the advantages and potential applications of this technology in various different fields.

**Key words** digital holography, holographic reconstruction, microstructure testing

### 1 前言

全息技术的思想最早是由英国科学家 Dennis Gabor<sup>[1]</sup>于 1948 年提出的, 由于受到光源等条件的限制, 直到 20 世纪 60 年代第一台激光器问世以来, 全息技术才获得了空前的发展. 全息技术的主要特点是它不仅记录了物体的振幅信息, 而且记录了物体的位相信息, 从而更加真实地反映了原物体. 其中数字全息技术是利用 CCD 等电荷耦合器件取代传统光学全息中的记录介质来记录全息图, 重建的过程在计算机中完成, 因此数字全息不仅继承了传统全息的特点, 而且还具有其自身的优点: (1) 没有湿处理过程, 可以实时进行图像的获取和处理. (2) 数值重建既能得到重建光波场的强度分布, 也能获取相位信息. (3) 采用脉冲激光作为光源时, 曝光时间短. (4) 数值重建还可以方便地进行数字聚焦, 容易实现三维观测. 数字全息已经被应用于干涉计量、微小粒子检测、器件形貌分析、微小形变与缺陷探测、显微成像和记录运动物体状态等诸多领域. 本文

将主要介绍数字全息的基本原理和数字全息图的几种重建方法, 以及数字全息技术在各个方面的应用.

### 2 全息技术的发展

全息技术的基本原理是: 物体反射的光波与参考光波相干叠加产生干涉条纹, 被记录的这些干涉条纹称为全息图. 全息图在一定的条件下再现, 便可重现原物体逼真的三维像. 根据全息图的记录手段和再现方式的不同, 一般可将全息技术分为三类: (1) 光学全息: 如图 1(a) 所示, 全息图的记录过程是光学过程, 再现过程也是利用光学照明来实现的, 这种全息过程就是传统的光学全息. (2) 计算全息: 如图 1(b) 所示, 利用计算机模拟光的传播, 通过计算机形成全息图, 打印全息图后微缩形成母板, 也可用激光直写系统形成计算机全息图(CHG), 或利用液晶光阀(LCD)或空间光调制器显示全息图, 利用

\* 北京市科技新星计划资助项目

2004-03-18 收到初稿 2004-05-31 修回

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: yzhang@mail.cnu.edu.cn

光学照明重现, 这样的全息方法称作计算全息 (3) 数字全息: 如图 1(c) 所示, 它是由顾德门<sup>[2]</sup>在 1967 年提出的一种新的全息成像方法, 以 CCD 等光电耦合器件取代传统的干版记录全息图, 并由计算机以数字的形式对全息图进行再现, 但是当时受到各种条件的制约, 一直没有重大的进展. 随着计算机技术的发展和高分辨 CCD 等电荷耦合器件的出现, 数字全息技术才得到迅速的发展. 数字全息图从形式上可以分为四种类型: (1) 像面数字全息图 (2) 数字全息干涉图 (3) 位相数字全息图 (4) 傅里叶变换全息图. 根据记录光路的不同, 数字全息分为同轴和离轴两种, 前者是参考光和物光共线, 对记录材料的分辨率要求很低, 适用于对微小物体的研究, 而后者是参考光和物光成一定的夹角, 对记录材料的分辨率要求很高, 适用于对大物体和不透明物体的研究.

行重建处理. 就光学全息和计算全息而言, 其重建过程属于光学再现过程, 即将记录物体全部信息的全息图经过一系列处理以后, 用适当的光照明全息图, 光通过全息图时的衍射光和衍射光之间的干涉形成了与原物光波相似的光波, 构成物体的再现像. 对于数字全息来说, 是先将 CCD 记录的全息图数字化, 然后在计算机中重建物体的再现像, 由此可见, 重建方法直接影响再现像的效果, 选择适当的数值重建方法是至关重要的, 为此我们将介绍几种常见的数值重建处理方法:

### 3.1 菲涅耳变换法

当物体与全息图平面的距离远大于物体的尺寸时, 我们可以利用离散逆菲涅耳变换重建原物像<sup>[3]</sup>, 即

$$u'(m, n) = \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} h(j, l) r(j, l) \cdot \exp\left\{\frac{i\pi}{d'\lambda}(j^2\Delta\zeta^2 + l^2\Delta\eta^2)\right\} \exp\left\{i2\pi\left(\frac{j \cdot m}{M} + \frac{l \cdot n}{N}\right)\right\}, \quad (1)$$

式中忽略了不重要的常数和相位因子.  $M, N, \Delta\zeta, \Delta\eta$  分别是 CCD 芯片在两个垂直方向上的像素数和像素尺寸. (1) 式表示了全息图  $h(x, y)$  与参考光  $r(x, y)$  乘积的逆菲涅耳变换. 物波的相位和强度由下面两式给出:

$$\phi(m, n) = \arctan \frac{\text{Im}|u'(m, n)|}{\text{Re}|u'(m, n)|} \quad [-\pi, \pi], \quad (2)$$

$$I(m, n) = u'(m, n) \cdot u'^*(m, n). \quad (3)$$

虽然利用离轴的方法可以有效地分离物像、共轭像和直流项, 但是要求所使用的 CCD 具有足够大的空间带宽积. 还有一些改进的方法用来直接去掉直流项和共轭像<sup>[4]</sup>, 以便得到更清晰的图像.

### 3.2 卷积法

由于衍射积分可以看作是物波函数与自由空间脉冲响应函数

$$g(x', y', \zeta, \eta) = \frac{1}{i\lambda} \frac{\exp\{ik\sqrt{d'^2 + (\zeta - x')^2 + (\eta - y')^2}\}}{\sqrt{d'^2 + (\zeta - x')^2 + (\eta - y')^2}} \quad (4)$$

的卷积. 因此, 我们可以利用解卷积的方法来重建原物像, 即

$$u' = F^{-1}\{H[h \cdot r] \cdot H[g]\}. \quad (5)$$

这种方法与菲涅耳变换的主要区别在于利用它得到的重建像的尺寸不随重建距离  $d'$  变化<sup>[5]</sup>, 便于研究光场的传播特性.

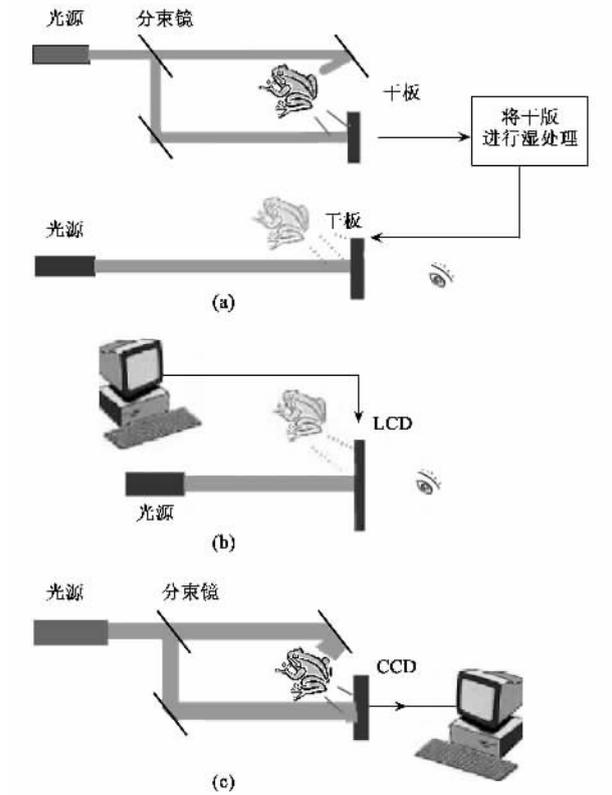


图 1 光学全息示意图 (a) 传统的光学全息 (b) 计算全息; (c) 数字全息

## 3 数字全息的重建方法

根据全息技术的基本原理, 我们知道全息图只是记录了物光波和参考光波相干叠加时产生的一系列干涉条纹, 要得到物体的再现像, 必须对全息图进

### 3.3 相移法

由于 CCD 的有效面积十分小,大大限制了离轴结构的应用,而同轴结构可充分利用数字成像器件的空间带宽积,被广泛地应用在数字全息中,但是在这种情况下,物体的像、共轭像和参考光是重叠在一起的。为了消除零级和共轭像,Zhang 和 Yamaguchi<sup>[6]</sup>提出了四步相移法,即在参考光束中分别引入 90°的相移,记录下四幅全息图  $I_k(k=0,1,2,3)$ ,全息图平面的物光波可以通过这些全息图得到:

$$u(x,y) = \sum_{k=0}^3 r_k I_k = 4r^2 a(x,y) \exp[i\phi(x,y)] \quad (6)$$

剩下的工作就是利用菲涅耳公式重建原物体了。这种方法虽然除噪效果好,但是试验装置比较复杂,压电晶体对环境的要求也比较高,所以在应用方面存在一定的局限性。

### 3.4 相位恢复法

如果我们知道物体的部分信息,就可以利用相位恢复算法来重建原物体。以恢复纯吸收物体为例,物体的相位分布可以认为是常数,这样数字全息图的重建问题就可以纳入已知物像强度分布和物体的相位分布,求解物体强度分布的广义位相恢复问题之中,迭带傅立叶变换算法和杨-顾算法等能很好地解决这一问题。物体的强度分布可以通过下面两式迭代求解:

$$\phi_{2k} = \text{Arg}[\sum G_{kj} a_{1j} \exp(i\phi_{1j})], \quad (7)$$

$$a_{1k} =$$

$$\frac{1}{A_{kk}} \text{Abs}[\sum G_{jk}^* a_{2j} \exp(i\phi_{2j}) - \sum_{j \neq k} A_{kj} a_{1j} \exp(i\phi_{1j})], \quad (8)$$

其中  $G$  代表菲涅耳变换算符  $A = G^* G$ ,  $a_1$ ,  $\phi_1$ ,  $a_2$ ,  $\phi_2$  分别是光波在物体平面和全息图平面上的振幅和相位分布。杨-顾算法也是一种相当重要的方法,它不仅解决了一般位相恢复算法中能量损失的问题,而且适用于多波长和多平面系统,基本不受初始值的影响,因此采用杨-顾位相恢复算法处理的重建图像具有更高的分辨率。图(2)给出了利用杨-顾算法重建纯吸收物体全息图的一个结果<sup>[7]</sup>,重建图像中由头发组成的十字叉丝十分清晰。

除了上述的几种方法外,小波变换<sup>[8]</sup>,分数傅立叶变换<sup>[9]</sup>等都可以用来进行数字全息的重建,这里就不再一一赘述。

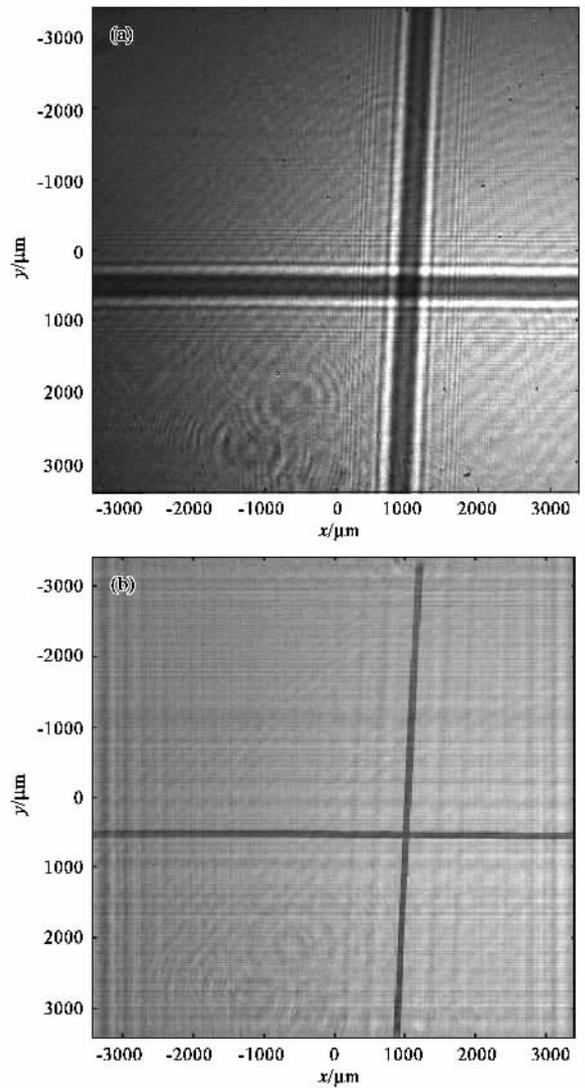


图2 利用杨-顾相位恢复算法重建的图像 (a) 全息图 (b) 重建图像

## 4 数字全息的应用

随着现代计算机技术和 CCD 技术的日臻完善,数字全息技术也走出了实验室,在许多方面得到了实际应用。

### 4.1 纯相位物体成像

数字全息能够测量具有任意形状的三维漫反射表面的物体,是一种无接触的三维观测方法,而且不论物体表面光洁度如何,都能达到波长量级的分辨率。研究者采用同轴数字全息与相位恢复算法相结合的成像方法对纯相位物体成像<sup>[10]</sup>,得到的是样品表面的位相分布,即可恢复样品的表面轮廓。这种成像过程相当简便,无需任何分束镜和反射镜,同时也

有助于提高信噪比,特别适合于短波长光波成像.如图3(a)所示,原始的样品是沉积在玻璃表面的一个图案,高度约330nm.图3(b)给出了经过相位恢复算法得到的重建二维图像,不难发现,原始图像得到了很好的恢复.图3(c)是相应物体的三维图,恢复的三维图中物体的高度分布清晰可见.这是由于算法中物体的高度与位相成一定的比例关系.

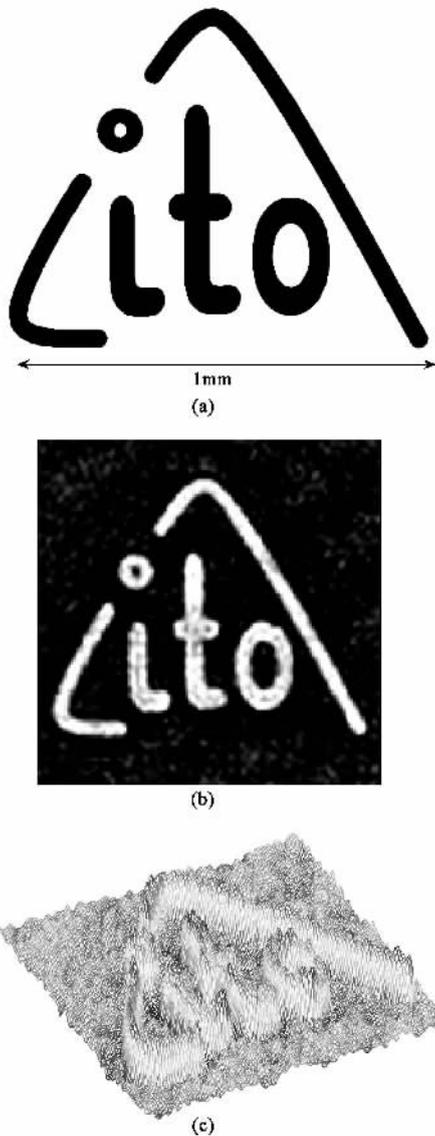


图3 纯相位物体成像结果 (a)原物体示意图 (b)重建图像 (c)重建图像的三维分布

#### 4.2 干涉计量

全息图再现的原物光与形变后的物光之间相干叠加,产生干涉条纹,根据干涉条纹的分布,可以分析物体的形变或受损等信息,这种方法称为干涉计量.在数字全息过程中,记录物体每一个状态的位相

分布以及随外界负荷增大时的一系列全息图,用以 $2\pi$ 为单位的解卷绕的方法对每个位相图进行实时处理,将所有的中间值相加,即可以获得整个物体的位相变化,而不需要任何进一步的解卷绕的处理<sup>[11]</sup>.采用卷绕方法处理的受热发生形变的位相分布图如图4(a)所示,我们可以得到干涉条纹,但具体变化并不清晰.如果把测量过程分成85步,且每一步的位相值都不超过 $2\pi$ ,在每一步中采用实时解卷绕的方法处理,就可以得到清晰的结果[如图4(b)所示].

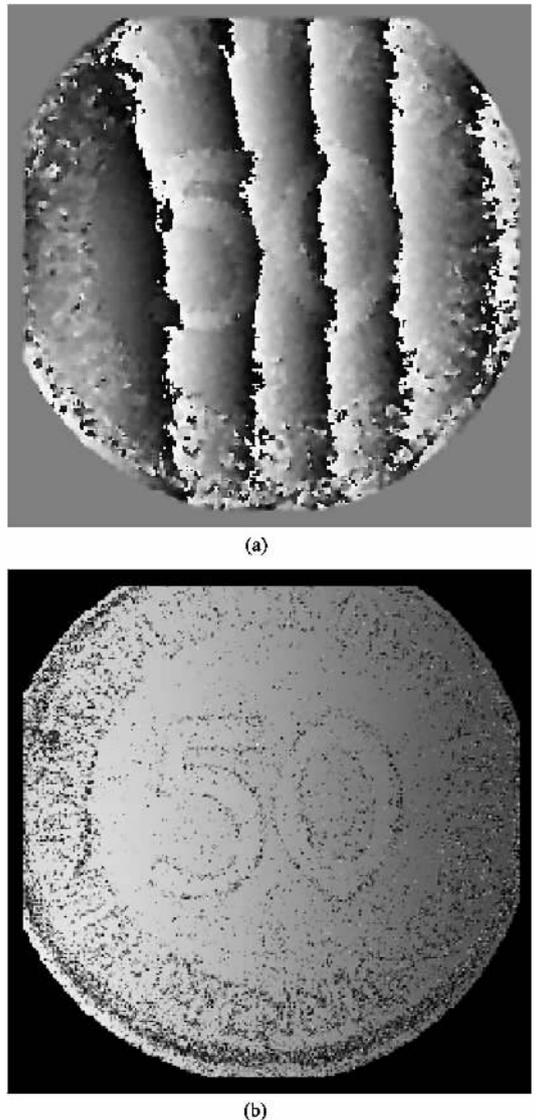


图4 (a)采用卷绕方法处理的受热发生形变的硬币的位相分布图 (b)解卷绕得到的结果

#### 4.3 动态全息测量

在实际光路中采用脉冲激光作为参考光和物光,可以记录运动物体的情况,将一个物体在两个不

同时刻的状态进行对比,从而可探测物体在一段时间内发生的任何变化. Liu<sup>[12]</sup>等人就用纳秒量级的激光光源和普通的 CCD 成像系统,利用全息方法测量空气放电的情况,时间分辨率达到 5.9ns,空气放电的过程被清晰地记录下来.如果采用皮秒激光光源,这种方法还可以得到皮秒级的时间分辨率.

目前,数字全息干涉计量分析在无损检验、微应力应变测量、形状和等高线检测、振动分析等领域中已得到广泛的应用,另外在震动测量<sup>[13]</sup>、生物粒子<sup>[14]</sup>监测方面也取得了一定的进展.

## 5 结束语

数字全息技术是一门正在发展中的新兴技术,有着广阔的应用前景,它不仅降低了传统全息图片的制作成本,而且可以直接在计算机上实现数字全息图的再现,它集中了光学全息和计算全息的优点,特别是同轴数字全息能够对微小物体的三维形貌进行测量,这些都是其他的技术所无法企及的,但目前来说数字全息方面存在的主要问题是 CCD 的分辨率不够高,数字重建的方法还不够完善.随着 CCD 技术的不断提高和研究者们不断地寻找新的数字重建方法,重建的原始像会更清晰,数字全息

技术在国内会得到更快的发展,其优点将会在实际中得到进一步的体现.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Gabor D. *Nature* ,1948 ,161 :777
- [ 2 ] Goodman J W , Lawrence R W. *Appl. Opt.* ,1967 ,3 :77
- [ 3 ] Kreis T , Jüptner W. *Opt. Eng.* ,1997 ,36 :2357
- [ 4 ] Liu C , Li L , Li Y *et al.* *Acta Optica Sinica* ,2002 ,22 :427
- [ 5 ] Seebacher S , Osten W , Jüptner W. *Proc. SPIE* ,1997 ,3098 :382
- [ 6 ] I. Yamaguchi I , Zhang T. *Opt. Lett.* ,1997 ,22 :1268
- [ 7 ] Zhang Y , Pedrini G , Osten W , Tiziani H J. *Appl. Opt.* ,2003 ,42 :6452
- [ 8 ] Belaid S , Lebrun D , Ozkul C. *Opt. Eng.* ,1997 ,36 :1947
- [ 9 ] Zhang Y , Pedrini G , Osten W *et al.* *Opt. Lett.* ,2004 ,29 :1793
- [ 10 ] Zhang Y , Pedrini G , Osten W *et al.* *Optik.* ,2004 ,115 :94
- [ 11 ] Kolenovic E , Lai S , Osten W , Jüptner W. *Proc. Intern Symposium Photonics in Measurement* ,2002 ,1694 :79
- [ 12 ] Liu Z , Centurion M , Panotopoulos G *et al.* *Opt. Lett.* ,2002 ,27 :22
- [ 13 ] Froning P , Pedrini G , Tiziani H J *et al.* *Opt. Eng.* ,1999 ,38 :2062
- [ 14 ] Owen R B , Zozulya A A. *Opt. Eng.* ,2000 ,39 :2178

## · 信息服务 ·



# Rensselaer

## 美国伦斯勒理工学院招生信息

Troy , New York , U. S. A.

November , 2004

JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph. D. in Department of Physics , Applied Physics , and Astronomy

Areas of research : Terahertz Imaging and spectroscopy , Terascale Electronics and photonics , Nano-Particles Physics , Bio-physics , Origins of Life , Astronomy , Elementary Particles Physics. Teaching , research assistantships , and fellowships are available.

**Application** : <http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

**Information** : <http://www.rpi.edu/dept/phys/>

**E-mail** : [gradphysics@rpi.edu](mailto:gradphysics@rpi.edu)