

利用单幅同轴菲涅耳数字全息图重构物光波面

王 波 李重光

(昆明理工大学激光研究所, 云南 昆明 650093)

摘要 在数字全息研究中,为了充分利用 CCD 器件有限的空间带宽积,常采用同轴全息记录。然而用同轴全息图再现时,再现物光波和共轭物光波是混在一起无法分开的。有效消除同轴全息图再现光波场中的共轭像是数字全息应用中的一项关键技术。基于菲涅耳衍射运算和逆运算,提出一种用同轴数字全息图重构物光波面的迭代算法。该方法利用同轴全息图再现时,再现物光波和共轭物光波衍射特性的不同来剔除共轭物光波成分,从而将再现物光波成分有效分离出,实现单幅同轴全息图的物光波面数值重构。计算机模拟实验证明了该方法简单易行。

关键词 全息;数值波面重构;菲涅耳衍射计算

中图分类号 TB877 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2104

Object Wave Reconstruction by Using Single in-Line Digital Fresnel Hologram

Wang Bo Li Chongguang

(Laser Institute, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

Abstract In the study of digital holography, an in-line optical arrangement is often made to record holograms so as to exploit the finite space band-width product of CCD sensor sufficiently. However, when an in-line hologram is used to reconstruct original object wave, its conjugate wave will coexist in the diffracted field. Separating desired component from conjugate component is very difficult. The effective elimination of conjugate image during numerical reconstruction through in-line hologram has been a crucial technique, which facilitates and promotes the application of digital holography. Based on Fresnel diffraction calculation and its inverse calculation, an iterative algorithm to reconstruct object wave from in-line digital hologram is presented. According to this method, conjugate component can be removed from reconstruction to get original object wave by utilizing the difference of their diffractive characteristics. The object wave can be reconstructed numerically through single in-line hologram. The computer simulation demonstrates that the method proposed here is feasible and easy to operate.

Key words holography; numerical wavefront reconstruction; Fresnel diffraction calculation

1 引 言

全息术因其可以记录和再现物体的三维信息而成为最具发展前景的非接触三维精密检测技术。然而,传统光学全息记录条件苛刻,物光波信息提取所需的处理环节过多,因而实际应用受到很大限制。数字全息的出现摆脱了其中的许多限制。由于采用与计算机相联的 CCD 实时获取全息干涉图,物光波所携带信息的记录和提取自然得到了计算机的全程

参与,这不仅加快了物光波信息的提取速度,而且还为三维物体的形貌分析和测量提供了方便。所以,近年来数字全息成为了全息研究的焦点,国内外的的发展都很迅速。

数字全息技术发展中首先遇到的问题是,目前的 CCD 探测器阵列不论是分辨率还是探测面的整体尺寸都达不到传统全息感光干板的水平^[1~3]。为了最大限度地利用 CCD 记录面的空间带宽积,

收稿日期: 2008-09-02; **收到修改稿日期**: 2008-12-19

基金项目: 云南省应用基础研究基金(2008F040M)、云南省教育厅重点项目基金(07L00006)和昆明理工大学科学研究基金(2008-11)资助课题。

作者简介: 王 波(1983—),男,硕士研究生,主要从事数字全息方面的研究。E-mail: wangbo@yahoo.com.cn

导师简介: 李重光(1966—),男,教授,主要从事光电检测技术和光学信息处理方面的研究。E-mail: licg66@yahoo.com.cn

采用同轴全息记录光路是一个好的解决办法。这就引出了如何消除同轴全息图再现中,与再现物光波共存的零级衍射和共轭物光波的问题。Yamaguchi 首先提出了四步相移法数值波面重构^[4],通过在参考光路中分别引入 $\pi/2$ 整数倍的相移记录下四幅干涉图,利用四幅干涉图的简单代数运算对物光波面进行数值重构。这一方法很好地解决了利用同轴全息图进行物光波面数值重构中消除零级衍射和共轭像的问题^[5,6]。但由于相移装置过于精密,全息记录条件仍然很苛刻,因此它的实际应用仍受到限制。Wang 提出了单步相移法数值波面重构,利用物光波和参考光波先后形成的两幅全息干涉图即可重构物光波面^[4]。其中一幅干涉图是在参考光中引入一个已知相移记录到的,另一幅记录时没有引入。单步相移法重构物光波面降低了记录条件,克服了多步相移法中因相移误差导致的重构失败。但该方法要求两次记录时物光波必须保持不变,而且同样存在

相位解包裹的问题,因此相移数字全息技术至今也只能局限于对静止物体的全息检测。实现动态物体的实时数字全息检测,最根本的途径是能够由单幅同轴全息图完成物光波面的数值重构。

本文以单幅菲涅耳同轴全息图作为处理对象,利用一个近似公式^[7]计算出物光波传播到 CCD 探测面上的强度分布,消除绝大部分直透光波成分。以菲涅耳衍射运算和逆运算作为物面和 CCD 探测面之间的迭代运算工具,在迭代过程中不断剔除共轭物光波成分,最终获得原物光波。模拟实验证明这种方法不仅可行,而且快速。

2 基本原理

如图 1 所示,设物平面 x_0, y_0 上的物光波分布为 $O_0(x_0, y_0)$, 到达 CCD 记录平面 xy 上的分布为 $O_H(x, y)$ 。给定能够很好地满足菲涅耳近似的两平面间距为 d 。于是两个平面上的光波场分布可以由菲涅耳衍射积分和衍射逆运算积分准确描述^[8]:

$$O_H(x, y) = \frac{\exp(ikd)}{i\lambda d} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} O_0(x_0, y_0) \exp\left\{\frac{ik}{2d}[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0, \quad (1)$$

上式简记为 $O_H(x, y) = F_r\{O_0(x_0, y_0)\}$, 并称为菲涅耳正变换。

$$O_0(x_0, y_0) = \frac{\exp(-ikd)}{-i\lambda d} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} O_H(x, y) \exp\left\{\frac{-ik}{2d}[(x_0-x)^2 + (y_0-y)^2]\right\} dx dy, \quad (2)$$

上式简记为 $O_0(x_0, y_0) = F_r^{-1}\{O_H(x, y)\}$, 并称为菲涅耳逆变换。

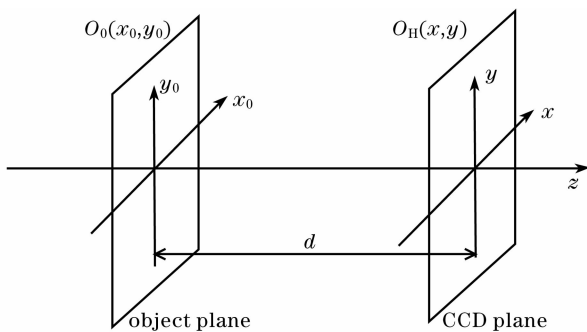


图 1 描述菲涅耳衍射的平面直角坐标系

Fig. 1 Cartesian coordinates for describing Fresnel diffraction

全息记录是利用干涉原理,将物光波所携带信息以干涉条纹的形式记录下来;再现则是利用全息干涉图的衍射来重新获得原物光波。假设到达 CCD 记录面的参考光波用 R_H 表示,则 CCD 探测面上记录到的强度分布为

$$H(x, y) = |O_H(x, y)|^2 + |R_H|^2 + R_H O_H^*(x, y) + R_H^* O_H(x, y). \quad (3)$$

再现时,(3)式中第一项和第二项对应直透光波成分,第三项对应共轭物光波成分,第四项则对应再现物光波成分。如果能从数字全息图中把直透成分和共轭成分都剔除掉,而且参考光已知,那么到达 CCD 记录平面上的物光波 $O_H(x, y)$ 即可求出,再通过一次菲涅耳衍射逆变换就能得到来自待测物体的原物光波 $O_0(x_0, y_0)$ 。

若选择均匀平面波作为参考光波,则参考光在 CCD 探测面上的强度分布 $|R_H|^2$ 可以处理为一常数,在全息图记录前进行一次曝光便可事先得到。传播到 CCD 探测面上的物光强度分布可根据文献^[7]中给出的近似公式做如下计算:

$$|O_H(x, y)|^2 \approx \frac{[H(x, y) - |R_H|^2]^2}{H(x, y) + |R_H|^2}. \quad (4)$$

将消除直透光波成分后的分布记为

$$H_c(x, y) = H(x, y) - |O_H(x, y)|^2 - |R_H|^2 = R_H O_H^*(x, y) + R_H^* O_H(x, y). \quad (5)$$

进一步消除(5)式右边的共轭物光波成分后,即可获得到达 CCD 记录面的物光波。

然而在传统光学全息中,同轴全息图(或 Gabor 全息图)衍射的 ± 1 级光波在空间不能分开,或者说再现观察时的背景噪声始终无法消除,这是它在实际应用上受到的主要限制。图 2 给出了同轴菲涅耳全息图记录和再现的示意图。

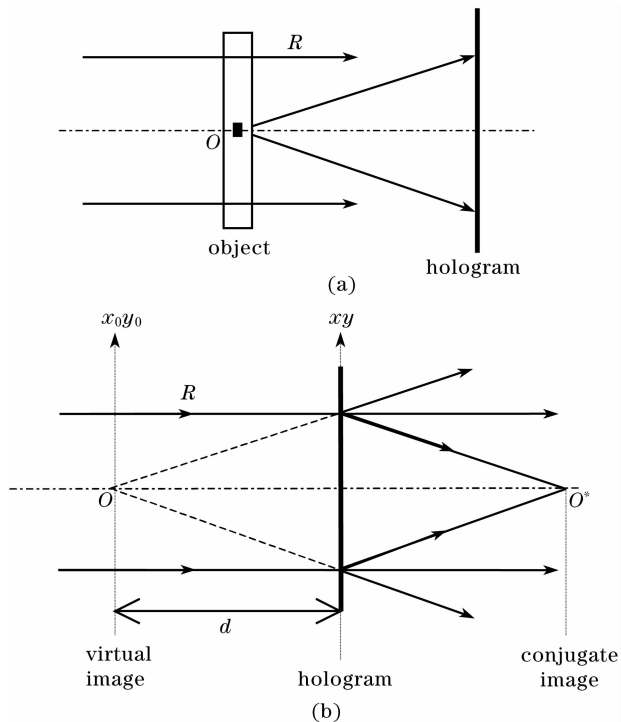


图 2 同轴菲涅耳全息图的记录和再现。(a) 记录;
(b) 再现

Fig. 2 Recording and reconstruction of in-line Fresnel hologram. (a) recording; (b) reconstruction

一个线性系统中传播的光波,在垂直于传播方向并分开适当距离的两个平行平面上的分布是相互关联的,这种关联关系可由菲涅耳正变换和逆变换比较准确地描述^[9]。不仅如此,当用记录时的原参考光垂直照射同轴全息图时,再现出的物光波所形成的虚像和共轭物光波所形成的实像,其像面位置在空间是分开的,而且关于全息图平面前后对称。如图 2(b)所示。这就为共轭物光波成分的剔除提供了可能。

3 迭代法数值波面重构

为简单起见,用一幅刻于不透明平板上的镂空图案作为物体,采用平面波照明物体, Mach-

Zehnder 干涉光路记录同轴菲涅耳数字全息图。以此例来阐述迭代法数值波面重构的思路,并进行计算机模拟实验验证。

首先,利用(4)式的计算结果可以确定出物光波衍射到 CCD 探测面上(即 $|O_H(x, y)|^2$)的主极大分布范围。根据已知距离 d 可以反推出原物光波 $O_0(x_0, y_0)$ 在物平面 $x_0 y_0$ 上的有值范围,记为 Σ 。然后将(5)式的计算结果进行一次菲涅耳逆变换,即 $F_r^{-1}\{H_c(x, y)\}$,并剔除 Σ 外的所有成分。以 Σ 内取值的复分布函数,记为 $u_1(x_0, y_0) \exp[i\phi_1(x_0, y_0)]$,作为迭代计算的初始函数。离散计算形式描述的迭代步骤如下:

$$1) F_r\{u_1(m, n) \exp[i\phi_1(m, n)]\} = U_1(p, q) \times \exp[i\Phi_1(p, q)];$$

$$2) F_r^{-1}\{U_1(p, q) \exp[i\Phi_1(p, q)]\}, \text{剔除 } \Sigma \text{ 外的成分后得: } u_2(m, n) \exp[i\phi_2(m, n)];$$

$$3) F_r\{u_2(m, n) \exp[i\phi_2(m, n)]\} = U_2(p, q) \times \exp[i\Phi_2(p, q)];$$

$$4) E_{\text{err}} =$$

$$\frac{\sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q |\text{sgn}[\Phi_2(p, q)] - \text{sgn}[\Phi_1(p, q)]|}{2 \times P \times Q}.$$

式中 m, n, p, q, P, Q 均为整数。其中 $P \times Q$ 即表示 CCD 探测器阵列的总像素数。sgn 为符号函数。重复步骤 1) 到步骤 4) 的迭代计算,当迭代到第 k 次时,若波面重构误差 E_{err} 小于给定值(如 1%),则停止迭代,此时:

$$O_0(m, n) = u_k(m, n) \exp[i\phi_k(m, n)],$$

$$O_H(p, q) = U_{k+1}(p, q) \exp[i\Phi_{k+1}(p, q)],$$

物光波面数值重构完成。

4 模拟实验验证

基于上述数值波面重构思想,编写程序在计算机上进行模拟实验验证。实验中所用的物体为一幅手写英文字母“KM”的透光片,图片尺寸:10 mm \times 10 mm(对应像素尺寸 512 pixel \times 512 pixel),如图 3(a)所示。用波长 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 的平面波照明。CCD 记录面离开物平面 308.6 mm,记录下的同轴菲涅耳全息图如图 3(b)所示。图 4(a)给出了消除零级成分后的重构结果,图 4(b)给出了用迭代算法进一步消除共轭成分后的重构结果。图 5 为波面重构误差随迭代次数增加而迅速减小的变化关系曲线。从图中可看出,迭代 4 次后波面重构精度已经很高。

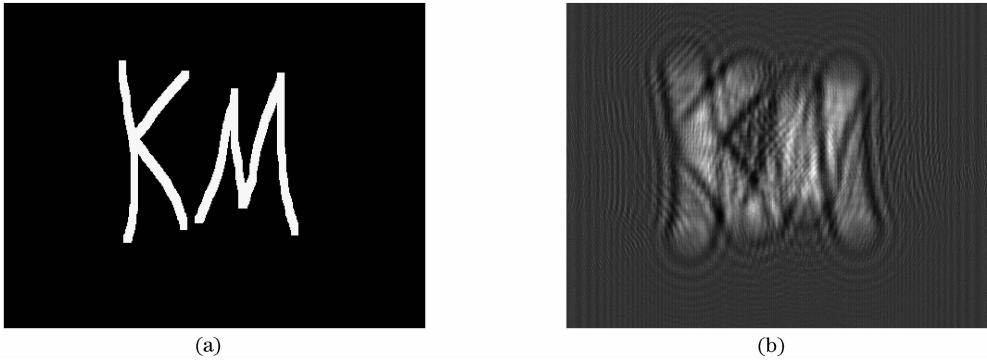


图 3 模拟实验物体及其同轴菲涅耳全息图。(a) 透明片物体;(b) 同轴菲涅耳全息图

Fig. 3 Object and its in-line Fresnel hologram in simulation. (a) transparent plane object; (b) in-line Fresnel hologram



图 4 重构结果。(a)消除零级成分后;(b)消除零级和共轭成分后

Fig. 4 Reconstructed image. (a) after removing zero-order component; (b) after removing zero-order and conjugate components

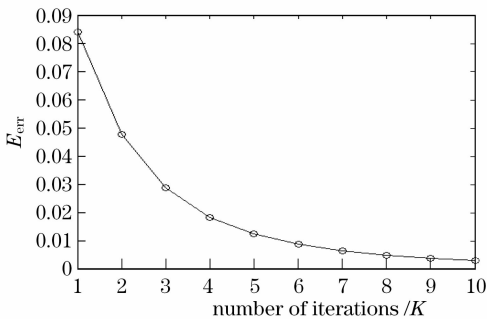


图 5 波面重构误差随迭代次数的变化

Fig. 5 Wavefront reconstruction error versus number of iterations

4 结 论

基于对菲涅耳衍射运算和逆运算的深入研究, 将菲涅耳变换和逆变换引入数值波面重构计算, 提出一种用同轴数字全息图重构物光波面的迭代算法。用该方法重构物光波面, 可以在迭代过程中逐渐剔除共轭物光波成分, 进而将原物光波成分从再现光场中有效分离出去。迭代法重构物光波面只需记录一幅同轴菲涅耳数字全息图, 利用已知的记

录距离和事先记录下的参考光分布即可进行重构, 因而能够实现单幅同轴全息图的物光波面数值重构。计算机模拟实验证明了该方法的可行性。在显微数字全息检测研究中, 能从单幅同轴全息干涉图中快速、有效地提取出物光波的振幅和相位分布, 是实现动态实时检测的关键所在。提出的单图重构方法, 所期望的目标是要将物光波面的全息记录条件和数值重构条件降至最低, 为实时数字全息检测的深入研究提供参考。

参 考 文 献

- 1 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lu Xiaoxu *et al.*. Analysis of some fundamental issue about digitalhologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 465~471
钟丽云, 张以谟, 吕晓旭 等. 数字全息中的一些基本问题分析 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 465~471
- 2 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lu Xiaoxu *et al.*. Some quantitative analysis about digital holographic reconstructed image [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 570~574
钟丽云, 张以谟, 吕晓旭 等. 数字全息图再现像的分析计算 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 570~574
- 3 Luo Peng, Lu Xiaoxue, Zhong Liyun. Recording and reconstruction of near-distance digital holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1735~1739
罗 鹏, 吕晓旭, 钟丽云. 近距离数字全息术记录和再现问题 [J].

- 光学学报, 2007, **27**(10): 1735~1739
- 4 Yingzong Wang, Yankun Zhen, Hongjun Zhang *et al.*. Study on digital holography with single phase-shifting operation [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(3): 141~143
- 5 Liu Wenwen, Dai Yiquan, Kang Xin *et al.*. Zero-order image elimination in digital hologram based on finite impulse response filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 856~859
刘雯雯,戴宜全,康新等. 基于有限脉冲响应滤波器的数字全息零级像消除[J]. 光学学报, 2008, **28**(5): 856~859
- 6 Huaying Wang, Dayong Wang, Jie Zhao *et al.*. Simple and robust digital holography for high-resolution imaging[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 165~167
- 7 Guliang Chen, Chingyang Lin, Mingkuei Kuo *et al.*. Numerical suppression of zero-order image in digital holography [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(18): 8851~8856
- 8 Li Junchang, Chen Zhongyu, Zhao Shuai *et al.*. Anti-calculation and its application of collins formula in wavefront reconstruction [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1489~1494
李俊昌,陈仲裕,赵帅等. 柯林斯公式的逆运算及其在波面重构中的应用[J]. 中国激光, 2005, **32**(11): 1489~1494
- 9 Junchang Li, Chongguang Li. Algorithm study of collins formula and inverse collins formula [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **A47**(4): 97~102

《激光与光电子学进展》“光学制造”栏目征稿启事

《激光与光电子学进展》是中国科学院上海光学精密机械研究所主办的激光、光电子领域行业性期刊,中国科技核心期刊。该刊1964年创刊,至今已出刊500余期,旨在促进国内外学术交流,沟通科研单位、生产部门与用户的联系。2009年,《激光与光电子学进展》将加大光学制造方向的报道力度,深入研讨光学制造的技术发展及其在工业、科研各方面的应用。主要涉及方向有光学元器件、光学仪器、光学加工、光学设计、光学材料、光学薄膜、光学检测等领域。

欢迎相关的科研、技术、市场人员根据我们栏目内容定位,撰写或向我们推荐涉及上述领域的优秀技术论文。来稿不收取审稿费和版面费,一经录用将优先发表并支付丰厚稿酬。

• 本栏目基本要求:

- 1) 稿件内容应为光学制造领域的最新进展、研究动态、科研和新品开发成果等方面;
- 2) 文章要求内容新颖、论点正确、论据充分、数据可靠、文理通顺;
- 3) 技术文章字数一般为5000字左右;综述文章字数最多不超过10000字,且第一作者需为副教授及以上职称。

• 投稿方式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/lop.htm>)直接上传稿件(主题标明“光学制造”投稿),也可以直接将稿件word版发至邮箱:dingjie@siom.ac.cn(主题标明“光学制造”投稿),如有问题欢迎垂询021-69918198与栏目编辑丁洁联系。

《激光与光电子学进展》编辑部