

文章编号: 1001-3806(2009)03-0276-03

基于灰度相关的数字全息孔径合成方法

张庆生, 吕晓旭*, 余清婷, 刘赣勇

(华南师范大学 信息光电子科技学院, 广州 510006)

摘要: 为了研究数字全息中孔径合成问题, 采用理论分析与实验验证的方法, 通过介绍合成孔径数字全息记录和再现的基本原理, 指出在合成孔径数字全息系统中, 准确拼接合成子全息图是系统获得高分辨率的重要因素。提出了一种基于图像灰度分布相关的算法用以解决子全息图的准确拼接以实现孔径合成, 介绍了该算法的原理, 分析了该算法精度并进行了相应的实验验证, 得到了预期成果。结果表明, 该算法能较好地解决子全息图的拼接合成问题, 在合成孔径数字全息系统中具有较好的适用性。

关键词: 全息; 数字全息; 孔径合成; 分辨率; 相关

中图分类号: O438.1 **文献标识码:** A

Method of aperture synthesizing in digital holography based on gray correlation algorithm

ZHANG Qing-sheng, LÜ Xiao-xu, YU Qing-ting, LIU Gan-yong

(School of Information Photoelectric Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to study the problem of aperture synthesizing in digital holography, the method of theoretical analysis and experimental verification was adopted. The fundamental principle of recording and numerical reconstruction of the synthetic aperture digital holography was introduced. It was proved that the most important factor was synthesizing all the sub-holograms precisely to get the high resolution. A new method based on gray correlation algorithm for solving the problem on how to synthesize sub-holograms precisely was proposed. The principle of the algorithm was introduced and the precision was analyzed. The experiment results show the feasibility of the algorithm.

Key words: holography; digital holography; aperture synthesizing; resolution; correlation

引言

如何提高数字全息系统的分辨率, 是数字全息技术发展需要解决的一个关键问题。目前, 在提高数字全息分辨率和再现像的信噪比方面, 已有不少解决方法, 如在数字再现中采用小波变换和卷积处理^[1,2]、边缘增强^[3]、在记录系统中用部分相干光源记录数字全息图, 以降低系统的散斑噪声^[4]等, 但由于受 CCD 图像传感器的性能参量限制, 这些方法的作用还是有限的。

合成孔径技术是一种通过小孔径基阵的移动来获得移动方向上的大的合成孔径, 从而得到移动方位方向的高分辨率的技术。将合成孔径技术应用于数字全息系统, 能有效地扩大记录面尺寸, 提高数字全息系统分辨率。早在 2000 年, 就有学者提出将合成孔径技术运

用于数字全息系统^[5], 此后, 国内外研究人员陆续对此进行了相关报道, 提出了一些实现方案, 如通过在方位方向上旋转被记录物体以实现合成孔径^[6], 通过利用两个独立 CCD, 一个固定, 另一个在 1 维方向上移动来实现孔径合成^[7], 将单曝光同轴数字全息与合成孔径技术相结合^[8]等, 在提高再现像的分辨率与信噪比方面取得了一些初步成果^[9-13]。作者在介绍合孔径数字全息记录再现原理的基础上, 指出在合成孔径数字全息系统中, 准确拼接各子全息图是实现孔径合成与系统获得高分辨率的重要因素, 提出了一种基于图像灰度相关的算法, 用以解决孔径合成中子全息图的准确拼接问题, 进行了相应的实验验证。

1 合成孔径数字全息的记录与再现原理

对于一数字全息系统, 由数字全息理论可知, 利用快速傅里叶算法进行再现时, 全息图再现像在 x 与 y 上的分辨率 Δx_i 与 Δy_i 被定义为^[14]:

$$\Delta x_i = \lambda d_i / L_x, \Delta y_i = \lambda d_i / L_y \quad (1)$$

式中, λ 为记录光波长, d_i 表示再现距离(一般与记录

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60747001)

作者简介: 张庆生(1983-), 男, 硕士研究生, 现主要从事数字全息与相位测量的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xiaoxulu48@sina.com

收稿日期: 2008-05-19; 收到修改稿日期: 2008-09-04

距离相等), $L_x \times L_y$ 为 CCD 的有效面积, 将合成孔径技术引入数字全息系统, 其记录原理如图 1 所示, 通过准

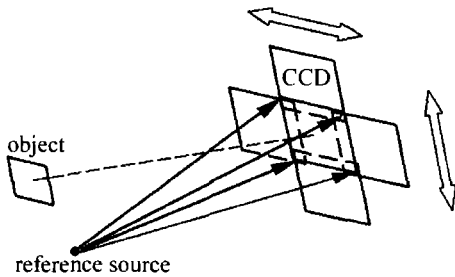


Fig. 1 Sketch for recording synthetic aperture digital hologram

确的上下、左右移动 CCD 采集 N 幅子全息图, 并将采集的 N 幅子全息图合成为 1 幅大幅面数字全息图(尺寸为 $NL_x \times NL_y$), 对其进行再现, 理想情况下, 合成孔径数字全息图再现像的分辨率 Δx_{syn} 与 Δy_{syn} 可达到:

$$\Delta x_{syn} = \lambda d_i / NL_x, \Delta y_{syn} = \lambda d_i / NL_y \quad (2)$$

将 CCD 记录的任意子全息图记为 $I_n(x, y)$, 对应的物光场和参考光场分别记为 $O_n(x, y)$ 和 $r(x, y)$, 由合成孔径原理可知, CCD 记录的全部子全息图合成的合成孔径数字全息图 $I(x, y)$ 可表示为:

$$I(x, y) = \sum_{n=1}^N I_n(x, y) = \sum_{n=1}^N |O_n(x, y) + r(x, y)|^2 \quad (3)$$

再现时, 将 CCD 记录的 N 幅子全息图(尺寸均为 $L_x \times L_y$) 拼接合成为 1 幅大幅面合成孔径数字全息图(尺寸为 $NL_x \times NL_y$) 后对其进行 2 维快速傅里叶变换运算再现, 由(2)式可知, 其再现像分辨率能得到大幅度提高, 假设再现光为 $R(x, y)$ ($r(x, y) = R(x, y)$), 则其再现过程可表示为:

$$A(x_i, y_i) = \sum_{n=1}^N I_n(x, y) R(x, y) = R(x, y) \sum_{n=1}^N I_n(x, y) = R(x, y) I(x, y) \quad (4)$$

由(4)式可看出, 保证合成孔径数字全息系统获得高分辨率的一个关键问题就在于如何保证各子全息图准确拼接合成为 1 幅大幅面的合成孔径数字全息图, 针对上述问题, 作者提出一种基于图像灰度分布相关的算法用以判断各子全息图的拼接边缘, 能较好地解决子全息图的准确拼接问题。

2 利用图像灰度分布相关算法实现子全息图拼接原理

合成孔径数字全息系统中, 为了保证系统的稳定性与精度, CCD 每次移动的距离不宜过大, 这时记录下的相邻两幅子全息图之间一般会存在重叠区域, 重叠区域的存在, 为准确拼接相邻两幅子全息图提供了条件。由

数字图像处理知识可知, 每幅单色的数字图像都有其特定的灰度分布, 本算法正是基于此, 通过在相邻两幅子全息图的重叠区域中选取特定模板, 以模板灰度分布作为相关参量进行相关计算, 判断相关系数变化推断相邻两幅子全息图重叠区域是否已重合, 进而找到拼接边缘位置, 解决子全息图的准确拼接合成问题。

根据相关理论^[15], 相关系数的大小直接反映了两个对象之间的相似程度, 相关系数越大, 两个对象就越相似, 其表达式可以由下式表示:

$$r_{ab}(m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a(n) b^*(n - m) \quad (5)$$

式中, r_{ab} 表示变量 a 与 b 的相关系数, 理想条件下, 假如相关系数达到 1, 则可认为两个对象完全相同, 但在实际处理过程中, 不可避免地存在各种因素的干扰, 相关系数无法达到 1, 这种情况下, 只需取相关系数达到最大值时的数据进行运算, 即可得到较为接近理想情况的结果。图像灰度分布相关算法原理示意图如图 2 所示, 以 1 维合成相邻两幅子全息图为例, 对该算法加

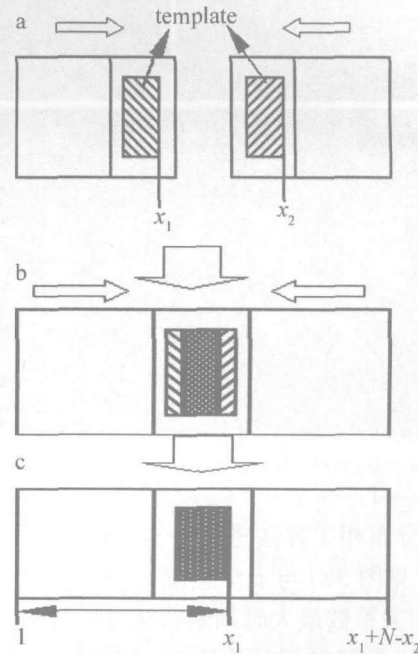


Fig. 2 Sketch for synthesizing two sub-holograms with gray correlation algorithm

a—two sub-holograms b—calculating correlation coefficient c—synthesizing two sub-holograms

以说明, 假设每幅子全息图合成方向上的像素数为 N , 在 CCD 每次移动过程中预先估计好重叠区域的前提下, 在其中 1 幅子全息图的重叠部分中选取一模板(模板宽度小于重叠范围), 记录该模板的位置 x_1 , 如图 2a 所示; 其次, 根据所选模板对两子全息图的灰度分布进行 2 维相关运算, 判断相关系数变化, 如图 2b 所示(此时的相关系数未达到最大值), 当相关系数达到最大值时, 可认为两幅子全息图的重叠部分已完全

重合,如图2c所示,记下此时第2幅子全息图移动的位置 x_2 ,然后对两子全息图进行拼接,可得到一横向尺寸为 $(x_1 + N - x_2)$ 像素的全息图,该全息图的 $1 \sim x_1$ 像素为第1幅子全息图的 $1 \sim x_1$ 像素, $(x_1 + 1) \sim (x_1 + N - x_2)$ 像素取自第2幅子全息图。从原理上看,该算法精度能达到像素级别,为了进一步提高该算法精度,可对各子全息图进行插值后再进行相关运算,这样就能使算法精度提高到亚像素级别。需要指出的是,为保证算法的精度模板宽度不能取的太小,一般选取为重叠区域面积的70%~80%。

3 实验与分析

实验光路按离轴无透镜傅里叶变换全息术要求安

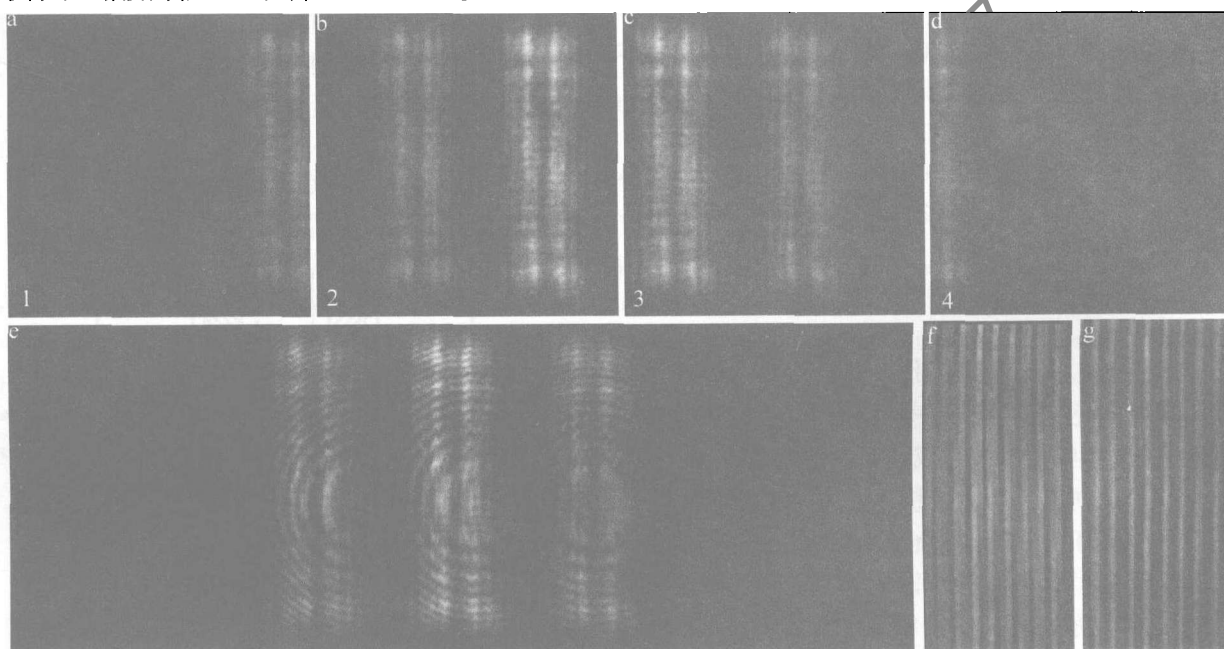


Fig. 3 a—sub-hologram 1 b—sub-hologram 2 c—sub-hologram 3 d—sub-hologram 4 e—hologram synthesized from four sub-holograms f—enlarged reconstructed image of sub-hologram 2 g—enlarged reconstructed image of synthesized hologram

排,为减少实验复杂性未加入相移装置,记录光波长为632.8nm,记录物体为1个10lp/mm的光栅,前面加一尺寸约为1mm×4mm的矩形光阑,CCD固定在可沿 x 方向移动的平台,用于记录 x 方向的合成孔径数字全息图,实验中记录距离为250mm,用于记录的CCD型号为MTV-1802CB,记录全息图尺寸均为512像素×512像素,像素大小为0.010mm×0.0108mm,实验数据如图3所示。

实验中记录了4幅有重叠的子全息图,采用图像灰度分布相关算法进行孔径合成时共进行了3次相关运算,其中,图3a~图3d分别为CCD记录的4幅子全息图,从图像看,单幅子全息图记录的信息非常有限,并不能同时完全记录物场的0级与±1级信息,利用

图像灰度分布相关算法进行子全息图拼接时,先对子全息图1(见图3a)与子全息图2(见图3b)进行相关运算,当相关系数最大时判断边缘进行拼接,此时最大相关系数为0.7361,利用同样办法拼接子全息图3(见图3c)与子全息图4(见图3d),得其最大相关系数0.7097,然后,将前面得到的两幅拼接图再进行相关计算后拼接,即可得到一尺寸为512像素×1407像素的全息图,如图3e所示,此时最大相关系数为0.9064,从图像可看出,此时物场的0级与±1级信息都可完全记录。但是,实验中发现,相关系数未达到理论上所说的1,这是由于实际条件下CCD的移动过程中不可避免地存在震动及外部条件干扰,相关系数无法达到理想情况,在这种情况下,可认为相关系数达到最大时两相邻子全息图的重叠区域已重合,求出拼接边缘位置后进行拼接合成再现,即可得到较为理想的结果。

再现结果如图3f与图3g所示,其中,图3f是由单幅子全息图2再现得到的放大再现像,图3g是由图3e按(4)式再现得到的放大再现像,与图3f相比, x 方向上的分辨率明显得到了提高,而在 y 方向上由于没有合成孔径效果,再现像的分辨率基本没有改变,这就证明了使用合成孔径技术后,系统分辨率能得到显著提高。

4 结论

数字全息系统中利用合成孔径技术可以显著提高再现像分辨率,保证子全息图的准确拼接合成是获得高质量再现像的重要因素,所提出的图像灰度分布相关算法可以较好地解决子全息图的拼接合成问题,实验结果证明,该方法在合成孔径数字全息系统中具有较好的适用性。

(下转第282页)

出。通过适当设计飞秒激光直写系统参量,得到合适的波导尺寸及折射率分布,从而优化波导与通信光纤的耦合损耗、波导传输损耗及抽运光和激光光场的重叠积分。这将为飞秒激光加工有源玻璃波导及其激光器设计提供一定的理论依据。

参考文献

- [1] DAVIS K M, MIURA K, SUGIMOTO N, *et al.* Writing waveguides in glass with a femtosecond laser [J]. *Opt Lett*, 1996, 21 (21): 1729-1731.
- [2] GLEZER E N, MILOSAVLJEVIC M, HUANG L, *et al.* 3-D optical storage inside transparent materials [J]. *Opt Lett*, 1996, 21 (24): 2023-2025.
- [3] CHAN J W, HUSER T, RISBUD S, *et al.* Structural changes in fused silica after exposure to focused femtosecond laser pulses [J]. *Opt Lett*, 2001, 26(21): 1726-1728.
- [4] SCHAFFER Ch B, BRODEUR A, GARCIA J F, *et al.* Micromachining bulk glass by use of femtosecond laser pulses with nanojoule energy [J]. *Opt Lett*, 2001, 26(2): 93-95.
- [5] NOLTE S, WILL M, BURGHOF J, *et al.* Femtosecond waveguide writing: a new avenue to three-dimensional integrated optics [J]. *Appl Phys*, 2003, A77(1): 109-111.
- [6] MINOSHIMA K, KOWALEVICZ A M, HARTL I, *et al.* Photonic device fabrication in glass by use of nonlinear materials processing with a femtosecond laser oscillator [J]. *Opt Lett*, 2001, 26(19): 1516-1518.
- [7] DELLA V G, OSELLAME R, CHIODO N, *et al.* C-band waveguide amplifier produced by femtosecond laser writing [J]. *Optics Express*, 2005, 13(16): 5976-5982.
- [8] TACCHEO S, DELLA V G, OSELLAME R, *et al.* Er: Yb-doped waveguide laser fabricated by femtosecond laser pulses [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(22): 2626-2628.
- [9] DELLA V G, TACCHEO S, OSELLAME R, *et al.* 1.5 μm single longitudinal mode waveguide laser fabricated by femtosecond laser writing [J]. *Optics Express*, 2007, 15(6): 3190-3194.
- [10] CHEN H Y, LIU Y Zh, DAI J Zh, *et al.* Design of Er^{3+} - Yb^{3+} codoped phosphate glass (LGS-L) waveguide amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(6): 697-701 (in Chinese).
- [11] KELSON I, HARDY A A. Strongly pumped fiber lasers [J]. *IEEE J Q E*, 1998, 34(9): 1570-1577.
- [12] OSELLAME R, CERULLO G, TACCHEO S, *et al.* Femtosecond laser writing of symmetrical optical waveguides by astigmatically shaped beams [J]. *SPIE*, 2004, 5451: 360-368.
- [13] OSELLAME R, CHIODO N, VALLE G, *et al.* Optical waveguide writing with a diode-pumped femtosecond oscillator [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(16): 1900-1902.
- [14] KARÁSEK M. Optimum design of Er^{3+} - Yb^{3+} codoped fibers for large-signal high-pump-power applications [J]. *IEEE J Q E*, 1997, 33(10): 1699-1705.

(上接第 278 页)

参考文献

- [1] LEBRUN D. Application of wavelet transform to hologram analysis: three-dimensional location of particle [J]. *Optics and Lasers Engineering*, 2000, 33(6): 409-421.
- [2] LIU Ch, LIU Zh G, BO F, *et al.* Separation of the reconstructed images in digital holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(5): 588-591 (in Chinese).
- [3] DUBOIS F, MONNPM O, YOURASSOWSKY C, *et al.* Border processing in digital holography by extension of the digital hologram and reduction of the higher spatial frequencies [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(14): 2621-2626.
- [4] LEFEVRE C B, COETMELLE C, PEDRINI G, *et al.* Short-coherence digital microscopy by use of a lensless holographic imaging system [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(22): 4489-4496.
- [5] CLERC F L, COLLOT L, GROSS M. Numerical heterodyne holography with two-dimensional photodetector arrays [J]. *Opt Lett*, 2000, 25(10): 716-718.
- [6] RENAUD B, JOSEPH C, JEAN-CLAUDE L. Short-range synthetic aperture imaging at 633nm by digital holography [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(23): 4775-4782.
- [7] KREIS T, KAYSER D. Resolution increase by aperture synthesis in digital holography [J]. *Opt Engng*, 2007, 46(5): 055803(1-7).
- [8] MARTINEZ L, JAVIDI B. Synthetic aperture single-exposure on-axis digital holography [J]. *Optics Express*, 2008, 16(1): 161-169.
- [9] MASSIG J H. Digital off-axis holography with a synthetic aperture [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(24): 2179-2181.
- [10] ZHONG L Y, ZHANG Y M, LU X X, *et al.* Synthetic aperture digital holography and multiple reference wave synthetic aperture digital holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(11): 1343-1347 (in Chinese).
- [11] WANG H Y, WANG D Y, XIE J J, *et al.* Study of the reconstructing methods of the digital off-axis lensless Fourier transform hologram [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3): 288-290 (in Chinese).
- [12] YUAN C J, ZHONG L Y, WANG Y P, *et al.* The analysis of off-axis digital holographic recording conditions [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(5): 482-484 (in Chinese).
- [13] MARTINEZ L, JAVIDI B. Improved resolution synthetic aperture holographic imaging [J]. *Proc SPIE*, 2007, 6778: 67780A(1-8).
- [14] KREIS T, JPTNER W. Digital in-line holography in partial measurement [J]. *SPIE*, 1999, 3744: 54-64.
- [15] CHENG P Q. Digital signal processing [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 185-215 (in Chinese).