

文章编号: 1001-3806(2015)02-0152-05

## 基于并行计算的实时数字全息显微镜

李 勇<sup>1,2,3</sup>, 毛 磊<sup>1</sup>, 章海军<sup>2</sup>, 马利红<sup>3</sup>, 王 辉<sup>3</sup>

(1. 浙江宁波永新光学股份有限公司, 宁波 315040; 2. 浙江大学 光电信息工程学系, 杭州 310017; 3. 浙江师范大学 信息光学研究所, 金华 321004)

**摘要:** 为了实现实时数字全息显微观测, 采用数字全息并行算法达到实时再现要求。首先根据设计的数字全息显微镜光路结构, 充分利用图像传感器空间带宽积, 通过实时记录方案采集全息图、物光强及参考光强以消除 0 级; 然后通过设计的并行再现软件, 将采集到的图像均匀分割为 4 个区域, 交由 4 个进程分别同时计算, 每个进程实现对应区域的全息图再现后, 将每个再现结果再均分成 4 个区域, 并将对应区域重新组合成 4 组数据交由 4 个进程分别同时进行叠加, 计算相位及强度; 最后将 4 个进程计算得到的相位、强度重新拼接成完整的再现强度及相位图。结果表明, 系统的数据采集和图像再现速度达到了 18frame/s。该设计系统实现了实时全息显微观测。

**关键词:** 全息; 全息测量; 数字再现; 空间频谱分析

中图分类号: O438.1 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.02.002

## Real-time digital holographic microscopy based on parallel calculation

LI Yong<sup>1,2,3</sup>, MAO Lei<sup>1</sup>, ZHANG Haijun<sup>2</sup>, MA Lihong<sup>3</sup>, WANG Hui<sup>3</sup>

(1. Ningbo Yongxin Optics Co. Ltd., Ningbo 315040, China; 2. Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310017, China; 3. Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

**Abstract:** For real-time measurement of digital holographic microscopy (DHM), a parallel algorithm was proposed. Firstly, real-time recording strategy was adopted to record hologram, intensity of object wave and intensity of reference wave according to light path of DHM. Zero-order of hologram was removed by this strategy. So, the product of spatial band-width of image sensor was efficiently utilized. Then, parallel reconstructing software was developed. The captured image was separated to four partitions and was sent to four procedures which run simultaneously. After the partitions were reconstructed by the corresponding procedure, each reconstructed result was separated to four regions. The corresponding regions were combined to four groups and were sent to four procedures for superposing and calculating phase and intensity. Finally, the whole phase and intensity map were obtained by merging four regions of phase and intensity. The experimental results reveal that the speed for image capture and hologram reconstruction is up to 18frame/s. Real-time measurement is realized with the proposed system.

**Key words:** holography; holographic measurement; digital reconstruction; spatial spectrum analysis

## 引 言

数字全息术在显微 3 维物体表面形变测量<sup>[1]</sup>、粒子场测试<sup>[2]</sup>、流场测定、生物样品显微测量<sup>[3-7]</sup>等方面有广泛的应用前景。全息图携带光波被物体调制后的振幅和相位信息, 将全息技术与数字技术相结合的数字全息术可以精确地分析物体的 3 维分布

和形貌等信息。数字全息显微技术具有其它显微技术不可替代的优点。尤其在生物样品显微测量领域, 数字全息显微术更具独特优势。其无需对样品进行标记、染色、固定等处理, 能实现真正无损、全场测量<sup>[8]</sup>。而且数字全息显微术还可以使生物样品置于生理溶液中进行真实环境下的动态监测, 可以用于获取细胞的动态特性、细胞间的相互作用以及细胞对药物的反应等信息<sup>[9]</sup>。实现实时观测是数字全息显微镜实用化过程中的关键问题之一<sup>[10-11]</sup>, 涉及到全息图的记录、再现等几个环节。本文中设计了技术上容易实现、系统结构相对简单的数字全息显微镜, 并采用与之对应的数字全息记录方法实

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61205012)

作者简介: 李 勇 (1972-), 男, 教授, 博士, 现主要从事数字全息、光学 3 维传感及 3 维显示的研究。

E-mail: liyong@zjnu.cn

收稿日期: 2014-06-12; 收到修改稿日期: 2014-07-04

现数字全息图的快速记录。在数据处理方面,基于目前多核计算机已经普遍应用的现实,根据数字全息图空间频谱特点,提出数字全息图处理并行算法,实现数字全息图的快速再现。给出了理论分析及实验验证。

## 1 结构及原理

### 1.1 系统结构及0级消除原理

图1为数字全息显微镜记录光路,采用同轴结构。其中BS<sub>1</sub>和BS<sub>2</sub>为分束棱镜,M<sub>1</sub>和M<sub>2</sub>为反射镜,L<sub>1</sub>为准直透镜,L<sub>2</sub>为显微物镜(实现样品显微放大),shutter 1和shutter 2为快门。从激光器出射的激光被BS<sub>1</sub>分为两束,其中一束经扩束作为参考光;另一束经扩束、准直为平行光,照射样品。透过样品的光再经显微物镜放大作为物光,与参考光在CCD表面干涉,形成全息图。

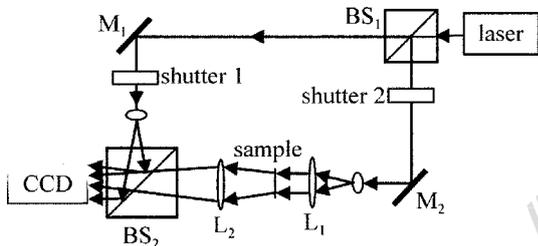


Fig. 1 Setup for digital holographic microscopy

采用菲涅耳近似时,参考光在记录面上的复振幅分布为:

$$R(x, y) = A \exp \left[ i2\pi \left( \frac{x^2 + y^2}{2\lambda z} \right) \right] \text{rect} \left( \frac{x}{N\Delta x} \right) \text{rect} \left( \frac{y}{M\Delta y} \right) \quad (1)$$

式中,A是参考光振幅,M和N分别是全息图在x和y方向的像素数,Δx和Δy是记录器件像素间隔。通过控制快门,CCD分别记录全息图:

$$I(x, y) = |O(x, y) + R(x, y)|^2 = I_o + I_R + OR^* + O^*R \quad (2)$$

式中,O(x, y)是物光复振幅,I<sub>o</sub>是物光光强,I<sub>R</sub>是参考光光强,上标\*代表复共轭。

参考光光强分布:

$$I_R(x, y) = |R(x, y)|^2 = I_R \quad (3)$$

物光光强分布:

$$I_o(x, y) = |O(x, y)|^2 = I_o \quad (4)$$

将干涉光光强分布((2)式)减去参考光光强分布((3)式)和物光光强分布((4)式),得到:

$$I'(x, y) = OR^* + O^*R =$$

$$OR \cos[\varphi_o(x, y) - \varphi_R(x, y)] \quad (5)$$

式中,φ<sub>o</sub>(x, y)是物光相位分布,φ<sub>R</sub>(x, y)是参考光相位分布。经过上述预处理后只剩下原始像和共轭像,实现了0级项消除。

### 1.2 共轭像消除及系统带宽积

消除0级后的数据((5)式)可以看成是参考光对物光进行了空间频率调制。只要调制频率与物光频谱匹配,则共轭像与再现像可以分离,简单地采用滤波法就能实现共轭像消除。根据在参考文献[12]中的分析,将全息图均分成4个区域,则在全息图的不同区域其频谱也不同。图2为全息图在4个区域内的频谱分布示意图。从上到下,从左到右分别为第一、第二、第三和第四象限的频谱分布。水

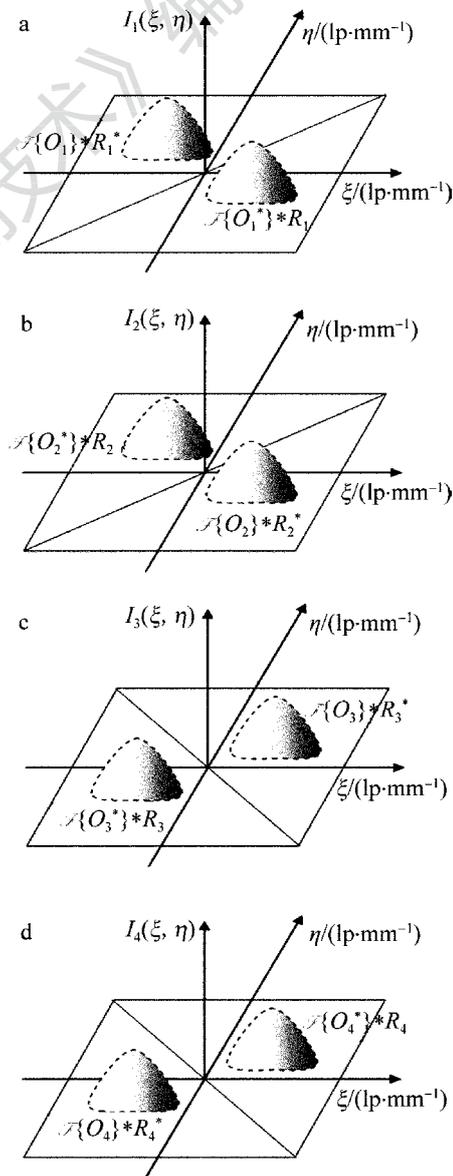


Fig. 2 Frequency spectrum of hologram in four partitions

平和垂直两个方向是空间频率,单位为 lp/mm;纵轴是归一化的幅度,无单位。

由图中可知,每个区域中原始像与共轭像所在的位置不同,必须先分别滤波再重新组合才能正确再现。要使全息图频谱分离,物光波的最高频率要满足下式:

$$f_o \leq \frac{1}{4\lambda z} \sqrt{(M\Delta x)^2 + (N\Delta y)^2} \quad (6)$$

在满足  $M=N, \Delta x=\Delta y$  及采样定理条件下,(6)式可以进一步简化为:

$$f_o \leq \frac{\sqrt{2}}{4\Delta x} \quad (7)$$

同时得到测量系统记录的空间带宽积  $s$  为:

$$s = \frac{1}{2}s_{\text{CCD}} \quad (8)$$

式中,  $s_{\text{CCD}}$  为图像传感器 CCD 的空间带宽积。在普通离轴全息图中,要求再现像和 0 级分离时,能记录的有效空间带宽积只能达到  $s_{\text{CCD}}$  的 1/16。如果用 1.1 节中所述方法去除 0 级,则有效空间带宽积能达到  $s_{\text{CCD}}$  的 1/4。可见,本文中方法的有效空间带宽积更高。

### 1.3 并行再现算法

通过上两节中的分析可知,数据预处理中 0 级项消除是 3 幅图像点对点的运算;而共轭像消除中需要将全息图均分为 4 个区域,每个区域分别滤波。因此全息图数据预处理中具备并行计算因素。下面分析再现过程中的并行因素。全息图再现是光的衍射过程。在满足菲涅耳近似时,其再现光波复振幅分布可以写成:

$$O_r(x',y') = \frac{1}{i\lambda z_0} \iint_{\Sigma} I''(x,y) \times \exp\left\{i \frac{\pi}{\lambda z_0} [(x-x')^2 + (y-y')^2]\right\} dx dy \quad (9)$$

式中,  $I''(x,y)$  是消除 0 级及共轭像后乘上再现光的数据。如果把全息面  $\Sigma$  划分成若干小区域  $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \dots, \Sigma_n$ , 则根据积分运算的叠加性质,(9)式可以写成各区域分别积分再叠加的形式:

$$O_r(x',y') = \sum_{j=1}^n \frac{1}{i\lambda z_0} \iint_{\Sigma_j} I''(x,y) \times \exp\left\{i \frac{\pi}{\lambda z_0} [(x-x')^2 + (y-y')^2]\right\} dx dy = \sum_{j=1}^n O_{r,j}(x',y') \quad (10)$$

结合共轭像消除处理过程,可以分别将全息图

每个区域中消除 0 级及共轭像后的数据由(10)式再现得到再现像。最后将各区域再现像复振幅叠加得到整个全息图的再现像。因此,全息的再现过程具有天然的并行性。

根据上述分析,设计了数字全息图再现并行计算算法。首先定义如下所示的 4 个矩阵,用于划分全息图数据。

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1\cdots 1 & 0\cdots 0 \\ 1\cdots 1 & 0\cdots 0 \\ 1\cdots 1 & 0\cdots 0 \\ 0\cdots 0 & 0\cdots 0 \\ 0\cdots 0 & 0\cdots 0 \\ 0\cdots 0 & 0\cdots 0 \end{bmatrix}, P_2 = \begin{bmatrix} 0\cdots 0 & 0\cdots 0 \\ 0\cdots 0 & 0\cdots 0 \\ 0\cdots 0 & 1\cdots 1 \end{bmatrix}, P_3 = \begin{bmatrix} 0\cdots 0 & 1\cdots 1 \\ 0\cdots 0 & 1\cdots 1 \\ 0\cdots 0 & 1\cdots 1 \\ 0\cdots 0 & 0\cdots 0 \\ 0\cdots 0 & 0\cdots 0 \\ 0\cdots 0 & 0\cdots 0 \end{bmatrix}, P_4 = \begin{bmatrix} 0\cdots 0 & 0\cdots 0 \\ 0\cdots 0 & 0\cdots 0 \\ 0\cdots 0 & 0\cdots 0 \\ 1\cdots 1 & 0\cdots 0 \\ 1\cdots 1 & 0\cdots 0 \\ 1\cdots 1 & 0\cdots 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

将拍摄到的图像分别与(11)式相乘,得到对应的 4 组分区图。然后将这 4 组分区图数据分配给 4 个进程并行处理。在 4 个分区内分别进行 0 级、共轭像消除及再现。为消除共轭像,定义了如下式所示的 4 个矩阵。

$$F_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & \cdots & 1 & 1 \end{bmatrix}, F_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}, F_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}, F_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

将消除 0 级后的数据进行傅里叶变换得到每个分区的频谱。将频谱数据分别乘以对应的矩阵,实现了共轭像消除。再将处理后的数据逆傅里叶变换并分别乘以再现光,然后每个分区采用(9)式再现。分别将再现后的数据均分为 4 个区域,将 4 个进程中划分的数据一一对应构成 4 组数据,并将它们分配给 4 个进程。将再现数据通过(10)式分别叠加得到对应每个区域的再现像复振幅,并求其相位、强度。最后拼接 4 个区域得到全息图完整的再现结果。获取 1 幅数字全息显微图像的流程见图 3。

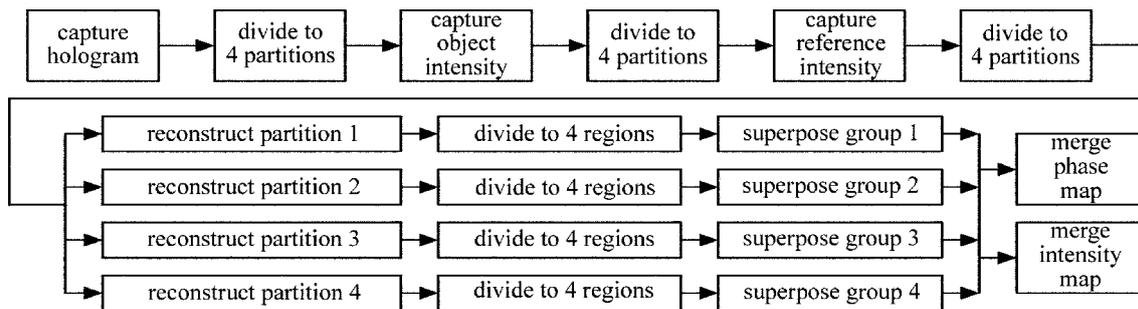


Fig. 3 Flow chart for obtaining digital hologram results

## 2 实验及结果

采用图 1 所示的像面数字全息系统制作了数字全息显微镜样机(见图 4)。所用 CCD 像素尺寸为  $7.4\mu\text{m} \times 7.4\mu\text{m}$ ,有效像素数为  $1000 \times 1000$ ,采集速率为 60frame/s。在记录时,通过计算机控制快门 shutter 1 和 shutter 2 与 CCD 曝光同步,依次记录参考光光强、物光光强和全息图。虽然这里记录了 3 次,但因为仅仅控制快门和摄像同步,没有任何相移或其它移动操作,3 帧图像记录时间仅为 0.05s。根



Fig. 4 Prototype of digital holographic microscopy

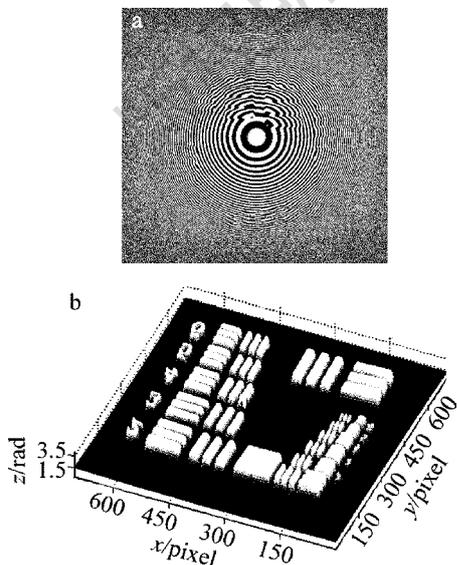


Fig. 5 Measurement result of digital microscopy  
 a—hologram b—reconstructed phase

据 1.3 节中所述算法,设计了并行计算软件,利用分辨率板进行了实验。图 5a 是所记录的全息图;图 5b 是再现像的相位分布。从图中可以看出,0 级及共轭像的干扰被消除,分辨率板得到了清晰再现。为评估数字全息显微镜在高度方向上的测量精度,测量了一个已知折射率且高度为 50nm 的台阶,测得台阶高度的平均值为 48.9nm。

最后,对串行算法及并行算法的计算时间进行了比较。实验中采用主频为 3.2GHz 的 Intel 4 核计算机。串行算法的计算时间为 0.19s,而采用四分区并行算法的计算时间为 0.054s。可见,采用四分区并行算法比串行算法速度提高了近 3 倍,达到实时再现的要求。

## 3 结 论

实时观测是数字全息显微镜应用中的关键指标之一。基于目前普遍使用的多核计算机,设计了并行再现软件,实现了大幅面数字全息图 18frame/s 的实时再现。设计制作了同轴结构的数字全息显微镜,最大限度地利用图像传感器的空间带宽积。采用无需相移的记录方案,实现了数字全息图的实时记录。实验结果表明,设计的数字全息显微镜达到了实时观测的要求。

### 参 考 文 献

- [1] ZHU L W, ZHOU C H, WU T F, *et al.* Femtosecond off-axis digital holography for monitoring dynamic surface deformation[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(13):2510-2518.
- [2] BOUCHERIT S, BOUAMAMA L, BENCHICKH H, *et al.* Three-dimensional solid particle positions in a flow via multiangle off-axis digital holography[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(18):2095-2097.
- [3] KEMPER B, CARL D, SCHNEKENBURGER J, *et al.* Investigation of living pancreas tumor cells by digital holographic microscopy[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2006, 11(3):034005.
- [4] YU L F, MOHANTY S, ZHANG J, *et al.* Digital holographic microscopy for quantitative cell dynamic evaluation during laser microsurgery[J]. *Optics Express*, 2009, 17(14):12031-12038.

- [5] ZHAO J, WANG D Y, LI Y, *et al.* Experimental study on the quantitative phase-contrast imaging of the biological samples by digital holographic microscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(11):2906-2911 (in Chinese).
- [6] WENG J W, ZHONG J G, HU C Y. Digital reconstruction based on angular spectrum diffraction with the ridge of wavelet transform in holographic phase-contrast microscopy [J]. Optics Express, 2008, 16(26): 21971-21981.
- [7] DU Y, ZHANG Y A, QIAN X F, *et al.* The design of real-time digital hologram reconstruction system by mixed programming[J]. Laser Technology, 2011, 35(6):841-843 (in Chinese).
- [8] MARQUET P, RAPPAZ B, MAGISTRETTI P, *et al.* Digital holographic microscopy: a noninvasive contrast imaging technique allowing quantitative visualization of living cells with subwavelength axial accuracy[J]. Optics Letters, 2005, 30(5): 468-470.
- [9] KEMPER B, VON B G. Digital holographic microscopy for live cell applications and technical inspection [J]. Applied Optics, 2008, 47(4): A52-A61.
- [10] QIU P Z, WANG H, JIN H Z, *et al.* Study on the simplified phase-shifting digital holographic microscopy[J]. Optik, 2010, 121(14):1251-1256.
- [11] MA L H, WANG H, LI Y, *et al.* Effect of system parameters on the reconstructed image quality in digital holographic microscopy [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(2):300-307 (in Chinese).
- [12] MA L, WANG H, LI Y, *et al.* Partition calculation for zero-order and conjugate image removal in digital in-line holography [J]. Optics Express, 2012, 20(2):1805-1815.

《激光技术》编辑部

版权所有 ©