

文章编号: 0258-7025(2010)11-2901-05

# 基于图形处理单元的数字全息图加速再现算法研究

丁鹤平<sup>1</sup> 朱竹青<sup>1\*</sup> 孙 敏<sup>2</sup> 王晓雷<sup>3</sup> 周延怀<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 南京师范大学物理科学与技术学院光电技术江苏省重点实验室, 江苏 南京 210046  
<sup>2</sup> 南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094  
<sup>3</sup> 南开大学现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071

**摘要** 研究了一种利用图形处理单元(GPU)加速数字全息图再现的算法。该算法充分利用 GPU 强大的并行计算能力,有效地缩短了数字全息图再现时间。比较了 GPU 加速运算和中央处理器(CPU)独立运算两种模式下,两种不同尺寸的数字全息图再现时间。结果表明,对于大小为 2048 pixel×2048 pixel 的数字全息图,GPU 算法的再现时间可缩短至约 1/15。利用该算法编写了易操作的通用软件。在高配置主机和高性能 GPU 硬件环境下,该软件不仅能够满足诸如数字全息显示、数字全息显微等系统实时功能的要求,还能够指导数字全息实验系统的快速搭建。

**关键词** 全息;再现算法;向量化循环;图形处理单元;并行计算

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103711.2901

## Study on Accelerating Reconstruction Algorithm of Digital Holography Based on Graphic Processing Unit

Ding Heping<sup>1</sup> Zhu Zhuqing<sup>1</sup> Sun Min<sup>2</sup> Wang Xiaolei<sup>3</sup> Zhou Yanhuai<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jiangsu Provincial Key Laboratory of Optoelectronic Technology, School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210046, China  
<sup>2</sup> School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China  
<sup>3</sup> Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China

**Abstract** A speed-up reconstruction algorithm of digital holography is studied based on graphic processing unit (GPU) hardware, which can effectively shorten the reconstruction time of digital hologram with powerful parallel computation capacity of GPU. The reconstruction time of two different size digital holograms are compared under GPU acceleration calculation mode and single CPU calculation mode. The result shows that the reconstruction time is shorten to be about 1/15 for a hologram size of 2048 pixel×2048 pixel with GPU mode. The speed-up reconstruction algorithm of digital holography is designed to be exercisable and universal software, which can satisfy the real-time demand of digital holography system such as display and microscopy and also can instruct rapid setup of digital holography experimental system.

**Key words** holography; reconstruction algorithm; vectorizing loops; graphic processing unit; parallel computation

收稿日期: 2010-03-01; 收到修改稿日期: 2010-03-31

基金项目: 江苏省高校自然科学基金(08KJJD40010)、江苏省普通高校研究生科研创新计划(CX09B-308Z)和光电技术江苏省重点实验室开放基金(1640703061)资助课题。

作者简介: 丁鹤平(1970—),男,硕士研究生,助教,主要从事数字全息理论和实验以及 GPU 计算在光学信息处理中的运用等方面的研究。E-mail: dingheping@njnu.edu.cn

导师简介: 周延怀(1954—),男,教授,硕士生导师,主要从事光电材料及信息处理、物理教育技术等方面的研究。E-mail: zhouyanhuai@njnu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: njzqzhu@163.com

## 1 引 言

自 1967 年 Goodman 等<sup>[1]</sup>提出数字全息技术以来,数字全息术已在诸如数字全息加密<sup>[2]</sup>、三维显示<sup>[3]</sup>、三维物体识别<sup>[4]</sup>、显微术<sup>[5,6]</sup>和太赫兹成像<sup>[7]</sup>等领域得到广泛应用。其原理就是采用光敏电子元件代替普通光学介质来记录全息图,从而获得一张数字全息图,再现时通过数字计算模拟光波场的衍射过程而获得再现像。若采集的全息图像素越多,则采用中央处理器(CPU)串行计算耗费时间越长,无法满足系统实时再现的需要。Masuda 等<sup>[8]</sup>提出了利用 FPGA 硬件技术实现数字全息再现加速计算的方法,对于大小为 256 pixel×256 pixel 的单幅全息图其再现时间可达 2.26 ms。但该技术硬件开发周期长,设计成本高,不易推广和应用。而目前飞速发展的图形处理单元(GPU)拥有大量的运算单元,能够进行高效的并行计算,并且具有内存带宽大、价格低廉等优点,因此成为人们运算大量密集型数据的首选。Masuda 等<sup>[9]</sup>利用 GPU 提高了计算全息图的生成速度,Song Zhang 等<sup>[10]</sup>利用 GPU 实现了高分辨实时三维形状测量,Tomoyoshi 等<sup>[11]</sup>把 GPU 引入衍射光学,加速了菲涅耳衍射积分计算。Ahrenberg 等<sup>[12]</sup>分析比较了基于 GPU 的两种快速傅里叶变换运算方法。由此可见,GPU 并行计算在光学计算领域具有很强的优势。由于 C 语言图形界面编写复杂,程序开发周期长,因此本文运用

Matlab 和 C 语言混合编程的方法,采用简单易学、功能强大的 Matlab 语言编写软件界面,利用 C 语言和统一计算设备架构(CUDA)开发包编写了基于 GPU 并行运算的数字全息再现程序,再现程序编译成 MEX 文件后被 Matlab 调用,从而实现 Matlab 软件中 GPU 加速运算。便于比较,又编写了基于 CPU 独立运行的 Matlab 优化数字全息再现程序。研究发现,对于再现大小为 2048 pixel×2048 pixel 的数字全息图,GPU 加速运算所需时间缩短为 CPU 独立运算时间的 1/15。若进一步选用高性能、大显存的 GPU,计算速度将进一步提高,再现运算时间可缩短至几十毫秒。正因为该软件具有如此高效的计算速度,因此在实时数字全息显示及数字全息实时显微成像等系统中,具有一定的研究和应用价值。

## 2 数字全息再现原理

数字全息再现是通过数字计算模拟光波场的衍射过程而获得再现像,常用的再现算法有惠更斯卷积法、菲涅耳衍射近似法和角谱法<sup>[13,14]</sup>。假设 CCD 像素个数为  $M \times N$ ,  $\Delta x$  和  $\Delta y$  分别为 CCD 相邻像素在水平和垂直方向的距离,获取的全息记为  $O(k, l)$ ,则根据离散后的菲涅耳衍射近似法,重构的数字全息视场复振幅  $u(m, n)$  可表示为

$$u(m, n) = \frac{1}{i\lambda z} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z\right) \exp\left[i\pi\lambda z \left(\frac{m^2}{M^2 \Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2 \Delta y^2}\right)\right] \times \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} O(k, l) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda z} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)\right] \exp\left[-i2\pi \left(\frac{k \cdot m}{M} + \frac{l \cdot n}{N}\right)\right] = \frac{1}{i\lambda z} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z\right) \exp\left[i\pi\lambda z \left(\frac{m^2}{M^2 \Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2 \Delta y^2}\right)\right] \cdot \mathcal{F}\left\{O(k, l) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda z} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)\right]\right\}, \quad (1)$$

式中  $(k, l)$  与  $(m, n)$  分别为二维数据矩阵(用来描述数字全息和再现场信息)的离散坐标,  $k$  和  $m$  取 0 到  $M-1$  的整数,  $l$  和  $n$  取 0 到  $N-1$  的整数。  $z$  为物体与 CCD 面的距离,  $\lambda$  为激光器工作波长。  $\mathcal{F}$  为二维离散快速傅里叶变换算符。从(1)式可以看出,再现像的生成实际上就是全息图与相位因子的乘积的二维傅里叶变换。比较三种再现算法,发现运算中均包括相位因子的计算和二维傅里叶变换计算。因此为了便于比较再现算法在 GPU 和 CPU 的中运算时间,仅研究了利用菲涅耳衍射近似法再现计算的情况。

为了提高再现图像的分辨率,往往选取大尺寸、多像素的 CCD 或 CMOS 器件,因此所获得的数字全息图像数据比较大。若计算  $O(k, l) \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda z} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)\right]$  公式,像素与像素对应的乘运算采用传统 C 语言中 FOR 循环编程语句进行计算,则非常耗时。而采用的 Matlab 中矩阵运算则可大大缩短计算时间,Matlab 中称作为向量化循环运算<sup>[15]</sup>。若数字全息图像数据密集,则向量化循环运算(文中标注为 CPU 独立运行模式)所需时间也将受限于 CPU 的性能和计算方式。为了能进一步缩短再

现算法运算时间,满足实时数字全息系统的需要, GPU 强大的并行计算能力将发挥高效的作用,可大幅提高再现算法运算速度。从(1)式可知,数字全息图中每一个像素都执行相同的乘运算和二维傅里叶变换运算,符合并行运算的特点。而 GPU 具有大量并行执行单元,可以并行处理每个像素的计算过程,将原有的串行循环计算过程转换为并行计算过程,因此从理论上也可以看出 GPU 加速数字全息再现的可行性。

### 3 Matlab 软件中 GPU 加速运算

为了实现 Matlab 与 C 语言混合编程, Matlab 软件设置了专门的标准接口来调用 C 语言设计的特定函数,从而实现 Matlab 语言无法完成或者无法高效完成的计算过程。

2007 年 6 月, NVIDIA 公司推出了 CUDA 开发包,使得程序员能够充分利用 GPU 的硬件资源

和计算能力。CUDA 编程模型将 CPU 作为主机, GPU 作为协处理器。其中 CPU 负责进行逻辑性强的事务处理和串行运算, GPU 则专注于执行高度线程化的并行处理任务<sup>[16]</sup>。利用 CUDA 开发包,可以用 C 语言来编写符合 Matlab 调用规范的函数,充分发挥 GPU 计算能力的程序,实现 Matlab 的易用性和 GPU 的强大计算能力的完美结合。

数字全息图再现函数的 C 语言源程序编译后生成 Matlab 可调用的 MEX 文件,其代码主要包括几个部分<sup>[17]</sup>:1)在 GPU 显存中申请所需要的数据存储空间;2)将原本在主机存储空间中的数据传送到 GPU 分配的存储空间;3)在 GPU 中运行再现计算代码;4)利用特定函数在主机中申请 Matlab 可操作的数据存储空间;5)将再现结果数据从 GPU 传回到主机中;6)最后释放所有申请的内存空间。

基于并行计算的数字全息图再现算法流程如图 1 所示。

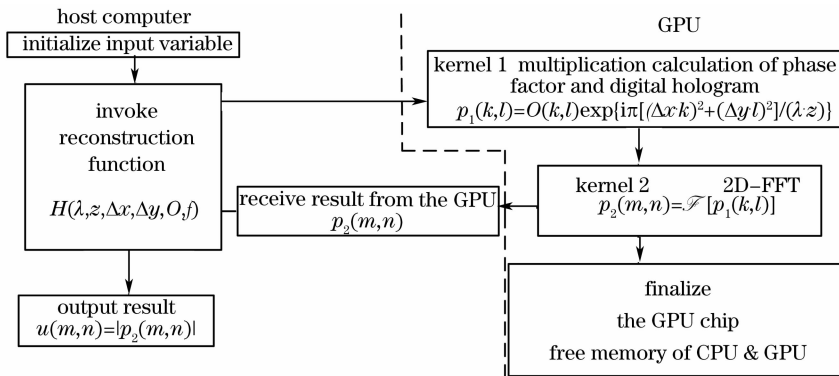


图 1 利用菲涅耳近似实现数字全息再现流程图

Fig. 1 Processing flow chart of digital holography reconstruction by Fresnel approximation

由图 1 可以看出,首先初始化程序相关参数,读入数字全息图;再由主机调用函数名为  $H(\lambda, z, \Delta x, \Delta y, O, f)$  的再现程序,其中形参  $f$  用于调整再现像的亮度。主函数  $H$  中有两部分在 GPU 中运行,其中 Kernel 1 计算相位因子  $\exp\left[i\frac{\pi}{\lambda z}(k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)\right]$  与数字全息图  $O(k, l)$  的乘积  $p_1(k, l)$ 。Kernel 2 在 GPU 中实现  $p_1(k, l)$  的二维傅里叶变换运算,计算结果  $p_2(m, n)$  返回主机,并同时清空 CPU 和 GPU 分配的内存空间;最后主机将得到的计算结果  $u(m, n) = |p_2(m, n)|$  实时显示。程序编写过程中注意两点:1) Matlab 软件中双精度数据类型与 GPU 中单精度类型间的转换;2)在 C 语言源程序中如何表示复数。

### 4 性能分析

研究中所采用的 GPU 硬件为 Geforce 9600 GT, 它含有 64 个 shaders, 256 M 内存, 总线带宽 256 bit。CPU 是 Core2 Duo CPU E6550, 主频 2.33 GHz, 主机内存 2.00 Gb, Winxp 操作系统。离轴菲涅耳数字全息图采用马赫-曾德尔干涉仪光路获得, 激光器工作波长为 650 nm, 物体(陶瓷小公鸡)到 CCD 靶面距离为 85 cm, CCD 大小为 1000 pixel×1000 pixel, 像素尺寸 4.65  $\mu\text{m}$ ×4.65  $\mu\text{m}$ 。为了优化快速傅里叶变换计算, 文中比较了全息图被补零到大小分别为 1024 pixel×1024 pixel 和 2048 pixel×2048 pixel 两种情况。针对这两种不同大小的数字全息图, 再现时的运算时间如表 1 所示。

表 1 CPU 与 GPU 计算时间比较

Table 1 Calculation time comparison between CPU and GPU

Image size /pixel	Calculation time by CPU /ms	Calculation time of GPU /ms	Ratio
1024×1024	1219	192	6.35
2048×2048	4593.2	304.6	15.08

从表 1 可以看出,对于大小为 1024 pixel×1024 pixel 的全息图,GPU 再现比 CPU 再现约快 6 倍。而对于大小为 2048 pixel×2048 pixel 的全息图,GPU 显示出其并行计算的优势,比 CPU 再现快 15 倍左右。由此可以推断出全息图像素越多,GPU 的再现计算效率越高。实验所采用的 GPU 显存仅为 256 M,受限于其较小的显存,当再现更大的数字全息图时,出现内存不足的现象,因此仅比较了两种大小的数字全息图再现的情况。图 2,3 分别为同一张全息图采用这两种不同再现算法所得到的三维物体再现图像,但由于现阶段 GPU 只支持单精度运算,其计算精度只有双精度运算的 1/8,因此运算累积的误差导致基于 GPU 计算的再现图像要比基于 CPU 计算的再现图像精度低,可以从再现像中直流项(就是图中的十字亮线)看出。不过再现图像质量提高可通过 GPU 产品升级和性能提升解决,目前报道的代号为“Fermi”架构的下一代 GPU 将支持双精度计算,但由于价格比较昂贵,GPU 双精度运算结果与 CPU 计算结果的比较将在后续研究中报道。

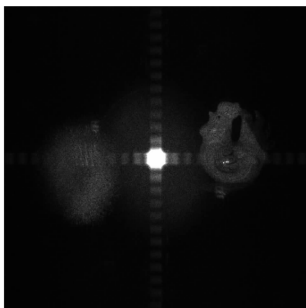


图 2 基于 CPU 运算的再现像

Fig. 2 Reconstructed image by CPU

图 4 为自主编写的数字全息图再现软件的运行界面。软件界面分三部分:1)图像显示窗口,左侧图像为数字全息图原图,右侧图像为其再现像,其中再现像进行了收缩均值滤波处理。2)再现参数设置部分(如工作波长,物与 CCD 间距,CCD 像素大小);3)再现算法选择,有基于 GPU 和基于 CPU 两种再现算法,同时再现像可保存为图像文件。界面中所示为实验中三维物体骰子的菲涅耳衍射离轴全息图

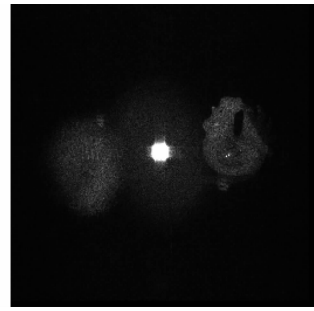


图 3 基于 GPU 运算的再现像

Fig. 3 Reconstructed image by GPU

和其再现像,实验参数如再现参数设置部分所示;在高配置主机和高性能 GPU 硬件环境下,该软件不仅能够满足诸如数字全息显示、数字全息显微等系统实时功能的要求,同时还能够指导数字全息实验系统的快速搭建。

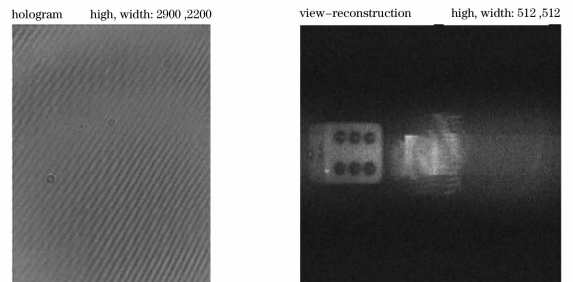


图 4 数字全息视场再现

Fig. 4 View-reconstruction of digital holography

## 5 结 论

研究了一种利用 GPU 加速数字全息图再现的算法,详细介绍了 Matlab 语言和 C 语言混合编写的基于 GPU 加速数字全息图再现软件的设计过程,比较了基于 Matlab 向量化循环优化的 CPU 独立运算和 GPU 并行计算两种模式下再现数字全息图所需的时间。根据现有的硬件条件测试表明,在 Matlab 软件环境下利用 GPU 并行计算数据,能够有效地缩短再现时间。尤其在处理密集型数据时,GPU 更显示出其加速计算的优势。再现大小为 2048 pixel×2048 pixel 全息图时,GPU 算法的再现时间仅需 305 ms,比 CPU 运算时间快 15 倍左右。虽再现时间暂时不能达到标准视频 25 frame/s 的要求,但通过提升 CPU 和 GPU 硬件性能,优化 GPU 内核代码,该软件不仅能够满足实时数字全息系统的需要,同时也能够保证再现像的质量。

## 参 考 文 献

- 1 J. W. Goodman, P. W. Lawrence. Digital image formulation

- from electronically detected holograms[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **11**(3): 77~79
- 2 Zhu Zhuqing, Feng Shaotong, Nie Shouping *et al.*. Complex valued encrypted image hiding technology based on discrete cosine transform[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 177~181  
朱竹青, 冯少彤, 聂守平等. 基于离散余弦变换的复值加密图像隐藏技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 177~181
- 3 Huadong Zheng, Yingjie Yu, Cuixia Dai. A novel three-dimensional holographic display system based on LC-R2500 spatial light modulator[J]. *Opt. Int. J. Light Electron. Opt.*, 2009, **120**(9): 431~436
- 4 B. Javidi, E. Tajahuerce. Three-dimensional object recognition by use of digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(9): 610~612
- 5 Zhijian Ma, Hongyan Li, Xiaoxu Lü. Complex amplitude reconstruction and phase aberrations compensation in phase-shifting in-line image digital holographic microscopy[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(12): 1076~1078
- 6 Hu Cuiying, Zhong Jingang, Gao Yingjun *et al.*. Selection of filter window and correction of tilt aberration in the phase reconstruction of microscopic digital holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3317~3322  
胡翠英, 钟金钢, 高应俊等. 显微数字全息相位重构的窗口选取和倾斜校正[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3317~3322
- 7 Y. Zhang, W. Zhou, X. Wang *et al.*. Terahertz digital holography[J]. *Strain*, 2008, **44**(5): 380~385
- 8 N. Masuda, T. Ito, K. Kayama *et al.*. Special purpose computer for digital holographic particle tracking velocimetry [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(2): 587~592
- 9 N. Masuda, T. Ito, T. Tanaka *et al.*. Computer generated holography using a graphics processing unit [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(2): 603~608
- 10 S. Zhang, D. Royer, S. T. Yau. GPU-assisted high-resolution real-time 3-D shape measurement [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20): 9120~9129
- 11 S. Tomoyoshi, I. Tomoyoshi, M. Nobuyuki *et al.*. Numerical calculation library for diffraction integrals using the graphic processing unit: the GPU-based wave optics library[J]. *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.*, 2008, **10**(7): 075308
- 12 L. Ahrenberg, A. J. Page, B. M. Hennelly *et al.*. Using commodity graphics hardware for real-time digital hologram view-reconstruction[J]. *J. Display Technol.*, 2009, **5**(4): 111~119
- 13 U. Schnars, W. Jueptner. Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques [M]. New York: Springer, 2005. 41~54
- 14 Myung K. Kim, Lingfeng Yu, Christopher J. Mann *et al.*. Interference techniques in digital holography[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2006, **8**(7): S518~S523
- 15 Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, Steven L. Eddins. Digital Image Processing Using Matlab[M]. Ruan Qiuqi *et al.*. Trans. Beijing: Electronics Industry Press, 2005, 39~42  
Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, Steven L. Eddins. 数字图像处理(Matlab版) [M]. 阮秋琦等译. 北京: 电子工业出版社, 2005. 39~42
- 16 Zhang Shu, Zhu Yanli. GPU-Based High-Performance Computing; CUDA [M]. Beijing: China Waterpower Press, 2009, 14, 15  
张舒, 褚艳利. GPU高性能运算这CUDA[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. 14, 15
- 17 NVIDIA. Accelerating Matlab with CUDA™ Using MEX Files. [R]. NVIDIA White Paper. 2007: 1~11