

文章编号: 1001-3806(2012)01-0026-03

基于 FPGA 技术的计算全息研究

简献忠 张 晗 范建鹏 周志刚

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了提高计算全息图的运算速率, 根据现场可编程门阵列技术的并行处理特性, 提出了一种基于现场可编程门阵列技术的计算全息实现方法。利用该方法分别制作了点光源和 2 维图像的菲涅耳计算全息图, 并由所生成的全息图再现出原始图像。结果表明, 用现场可编程门阵列技术实现分辨率为 50×50 的全息图的运算速度是传统 MATLAB 实现的 165 倍。该研究结果对实现计算全息的实时性具有重要的意义。

关键词: 全息; 并行处理; 循环迭代算法; 光强分布

中图分类号: O438.1 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.01.008

Research of computer-generated hologram based on FPGA technology

JIAN Xian-zhong, ZHANG Han, FAN Jian-peng, ZHOU Zhi-gang

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A method based on parallel processing of field programmable gate array (FPGA) technology was put forward to accelerate the computation speed of computer-generated hologram (CGH). Its Fresnel CGH of a point and two-dimension images were produced particularly and the numerical reconstruction of CGH was realized. The experimental results show that the computational speed of a resolution of 50×50 hologram based on FPGA is 165-fold of traditional MATLAB implementation. The study is helpful for implementing real-time CGH.

Key words: holography; parallel processing; loop iterative algorithm; intensity distribution

引言

计算全息是建立在数字计算与现代光学基础上的一种新的制作全息图的技术。传统的全息技术是用光学的办法, 即用干涉记录的方法制作全息图。计算全息是用计算机编码制作全息图, 把物波的数学描述输入数字计算机处理后, 直接产生全息图。与光学全息相比, 计算全息具有灵活方便、高重复性、适用范围广、对环境要求低等优点^[1], 因而计算全息技术的研究越来越受到重视。菲涅耳计算全息图^[2-3]是当前应用最广泛的计算全息图 (computer-generated hologram, CGH), 一般通过逐点计算的方法获得全息面上每个采样点的光强度分布^[4-5], 且通常使用矩阵实验室 (matrix laboratory, MATLAB) 进行仿真得到全息图。该方法可以实验研究或全息图的静态显示, 对于实时显示存在计算时间过长的技术缺陷, 尤其对于 2 维物

体或 3 维物体的全息图, 这种方法计算速率相对较慢, 无法做到实时显示。为了计算全息图的实用化, 如何实现全息图的实时显示是一个急需解决的技术问题。鉴于现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 技术的并行性优势, 作者提出了基于 FPGA 并行处理的计算全息图制作方法, 为实现计算全息的实时性进行了探索。基于 FPGA 技术的计算全息基本思路是: 将全息面上各点光波的数学模型变换为由仅与水平或垂直方向有关的独立分量, 通过大量的四则运算来代替原来的三角函数和平方运算, 减少了全息图的运算量, 使该优化算法便于 FPGA 编程实现, 并通过显示绘图阵列 (video graphics array, VGA) 接口显示得到全息图。

1 计算全息图的实现算法

计算全息图是用于存储和再现波面信息的干涉图。用计算机模拟产生光学干涉图需要预先知道干涉图样的数学表达式, 所以制作计算全息图的第 1 步就是要得到一幅干涉图样的数学表达式。

任何物体都可以看成是由有限个数的点组成的, 计算机模拟点光源的光学传播, 得到该点在全息面上的光

作者简介: 简献忠 (1969-), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为信息处理、嵌入式系统开发与应用、微弱信号检测、图像处理等。

E-mail: jianxz@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-04-27; 收到修改稿日期: 2011-07-06

强分布 叠加所有物点的光强可得物光波在全息面上的信息数据 然后数值计算物光波与参考光波的干涉图样和对干涉图样数据进行编码 得到全息图的数据。

假设参考光与全息面垂直,那么全息面上各点处的光强度可以用下式表示^[6-7]:

$$I(x_h, y_h) = \sum_{b=1}^M A_b \times \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x_h - x_b)^2 + (y_h - y_b)^2 + z_b^2}\right] \quad (1)$$

式中 x_b, y_b 表示物体上的水平坐标和竖直坐标; x_h, y_h 表示全息面的坐标; z_b 表示物体到全息面的距离; A_b 表示物体上第 b 个点光源在全息面上点 (x_h, y_h) 处的幅值; λ 表示参考光的波长。

由于物体上的采样间隔 $\Delta x \ll z_b, \Delta y \ll z_b$, 将开平方运算进行近似取值,为简单起见,分别用 x_{hb} 和 y_{hb} 来代替 $(x_h - x_b)$ 和 $(y_h - y_b)$ 。可得^[8-10]:

$$I(x_h, y_h) = \sum_{b=1}^M A_b \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(z_b + \frac{x_{hb}^2 + y_{hb}^2}{2z_b}\right)\right] \quad (2)$$

由于含有平方运算,利用采样间隔 p 对 (2) 式进行归一化处理,得到:

$$I(x_h, y_h) = \sum_{b=1}^M A_b \times \cos\left\{2\pi\left[\frac{pZ_b}{\lambda} + \frac{p}{2\lambda Z_b}(X_{hb}^2 + Y_{hb}^2)\right]\right\} \quad (3)$$

经过归一化处理后, (3) 式中的 X_{hb}, Y_{hb}, Z_b 均化为整数。根据菲涅耳计算全息循环迭代算法原理,可以用加法迭代运算来代替平方和运算,即物体上任意一个物点 (X_b, Y_b, Z_b) 到全息面上任意一点 (X_h, Y_h) 之间的距离可以由该物点 (X_b, Y_b, Z_b) 与 (X_h, Y_h) 相邻点 (X_{h-1}, Y_{h-1}) 或 (X_h, Y_{h-1}) 之间的距离确定。将 (3) 式中的相位做单独列项处理可得:

$$I(X_{h+k}, Y_h) = \sum_{b=1}^M A_b \cos(2\pi\Phi_k) \quad (4)$$

$$\Phi_0 = \frac{pZ_b}{\lambda} + \frac{p}{2\lambda Z_b}(X_{hb}^2 + Y_{hb}^2),$$

$$\Gamma_0 = \frac{p}{2\lambda Z_b}(2X_{hb} + 1) \Delta = \frac{p}{\lambda Z_b} \quad (5)$$

$$\Phi_{k+1} = \Phi_k + \Gamma_k, \Gamma_{k+1} = \Gamma_k + \Delta \quad (6)$$

对于 (3) 式中相位的计算,需要用到两个常数,从中单独列出做如下处理:

$$Z_{-1} = \frac{p}{2\lambda Z_b}, Z_{-2} = \frac{pZ_b}{\lambda}, Z_b = \frac{z_b}{p} \quad (7)$$

(5) 式 ~ (7) 式组成了完整的计算全息算法, (5) 式用于计算物体上任意一点在全息面上每行第 1 个点的光强度值 $I(x_0, y_h)$, 然后根据 (6) 式计算全息面上同一行上其它点的光强度值 $I(x_0, y_{h+1}), I(x_0, y_{h+2}), I(x_0,$

$y_{h+3}), \dots, I(x_0, y_{h+n})$ 。

2 软件设计

为了便于说明,将 (5) 式称为基本处理单元, (6) 式称为加法处理单元。基本处理单元完成全息面上每行初始相位及叠加值的计算,加法处理单元完成全息面同一行上除第 1 个点外其余点的光强分布。

对于单点而言,可以在基本处理单元中直接输入其坐标位置从而计算出初始相位,然后将其对应光强值求出。对于 2 维图像来说,将物点坐标位置存于只读存储器(read-only memory, ROM) 中,在基本处理单元中调用即可。由于余弦函数是周期函数,可以采用查找表的方式得到光强值,所以,由相位值得到光强分布只需加一个查找表。

初始相位的计算是必不可少的,因此,为了提高运算速度,只能从加法处理单元处考虑。从 (6) 式可以看出,加法处理单元可采用并行计算,由初始相位一次性得到全息面同一行上所有点的相位值,将多个加法处理单元串联起来。其设计思路为:第 1 个加法处理单元的输入直接由基本处理单元计算得到的初始值进行赋值,后面其余的所有加法处理单元的输入均为上一个加法处理单元的输出值,并且每个加法处理单元都输出全息面上一个点的光强值。

并行加法处理单元中加法处理单元的个数可根据全息图分辨率来设定,当然也需要考虑 FPGA 芯片的端口数量。基本处理单元和并行加法处理单元的原理图分别如图 1 和图 2 所示。

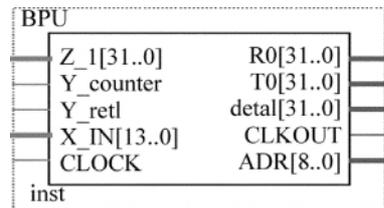


Fig. 1 Basic processing unit

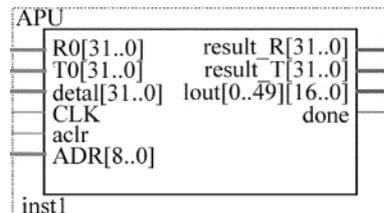


Fig. 2 Parallel addition processing unit

3 计算全息图的制作

用了 3 个模块来完成全息图的计算及显示: (1) 计算全息运算模块; (2) 存储模块; (3) 显示控制模块。系统框图如图 3 所示,本文中所用硬件如图 4 所示。

由于全息图的分辨率影响并行处理单元的个数,

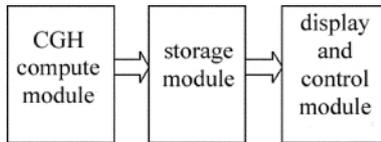


Fig. 3 System block diagram

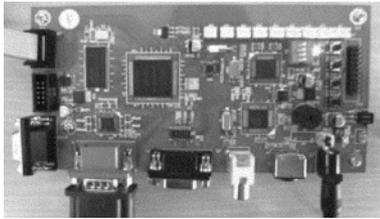


Fig. 4 Hardware

并对 FPGA 芯片内的逻辑单元及存储空间均有限制。对于点光源而言,点光源的位置直接影响其在全息面上的光强分布。以分辨率为 50×50 的点光源全息图为例,假设点光源在全息面上的投影为其中心,3 个参量分别设置为:距离 $z_b = 500\text{mm}$ 、采样间隔 $p = 40\mu\text{m}$ 和波长 $\lambda = 650\text{nm}$ 。程序运算结果通过 VGA 接口显示的 50×50 全息图及其数值再现像如图 5 所示^[11]。

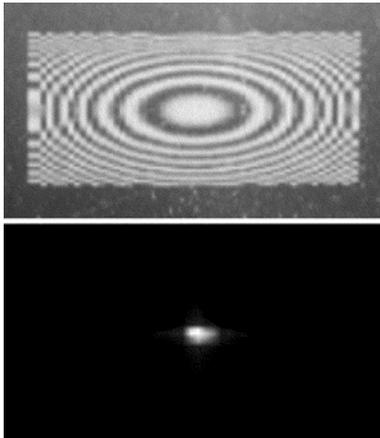


Fig. 5 VGA display hologram of point source and numerical representation

下面以一幅写有“天”字,分辨率为 80×80 的 2 维图像为例来说明 2 维计算全息图的制作。首先需要获取组成物体的点光源的位置;其次,由于组成物体的每个点对全息面上所有点的光强分布均有贡献,需要增加叠加模块来完成所有物点在全息面上的光强叠加;最后,分辨率的变化和物点的多少会影响最终数据量的大小,需要考虑存储器的容量,也可以将全息数据存放于外部存储器中。程序编译报告如图 6 所示。由图可得所用的 FPGA 门数及存储空间大小。

Device	EPF10K10-10
Timing Models	Final
Met timing requirements	Yes
Total logic elements	2,828 / 4,608 (61%)
Total combinational functions	2,828 / 4,608 (61%)
Dedicated logic registers	23 / 4,608 (<1%)
Total registers	23
Total pins	85 / 99 (96%)
Total virtual pins	0
Total memory bits	102,400 / 119,808 (85%)
Embedded Multiplier 9-bit elements	14 / 26 (54%)
Total PLLs	0 / 2 (0%)

Fig. 6 Compilation report

程序运行后,通过 VGA 接口显示的 80×80 2 维计算全息图及其数值再现像如图 7 所示,原始图像如图 8 所示。

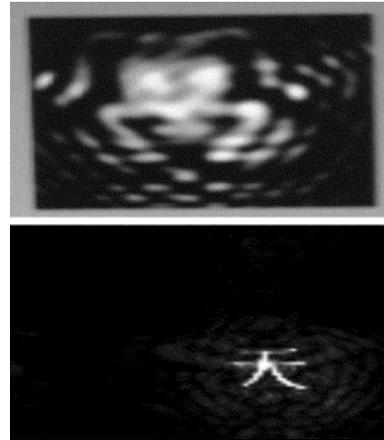


Fig. 7 VGA display hologram of 2-D image and numerical representation



Fig. 8 Original image

4 试验结果分析

由程序运行结果得到,基本处理单元运算最大延时为 37.50ns ,加法处理单元模块最大延时约为 8.672ns 。若采用并行运算实现一幅分辨率为 50×50 的全息图,则需要的时间约为 $50 \times 37.50\text{ns} + 50 \times 49 \times 8.672\text{ns} = 23121.4\text{ns}$;用 MATLAB 实现一幅相同分辨率的点光源全息图,所需要的时间约为 0.0038147s 。那么,采用基于 FPGA 并行运算实现计算全息图约比 MATLAB 计算速率快 165 倍。

5 结束语

提出了一种基于 FPGA 的计算全息图生成方法。通过分析菲涅耳全息图数学模型,运用迭代的方法简化计算过程,极大地减少了计算量,并通过 FPGA 的并行处理特性,先计算全息面上每行第 1 个点的光强值,其余位置的计算通过简单的乘法、加法运算叠加来得到其光强,进一步加快了计算速度,有效缩短全息图的计算时间,并由所生成的全息图再现出原始图像,验证了该方法的可行性。由试验结果可以看出,采用基于 FPGA 并行处理的方法实现计算全息图,可以大大提高全息图的运算速度,而且制作过程相对比较简单,为计算全息图的实时显示进行了有益的探索,该方
(下转第 32 页)

- ing effect [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, 38(3/4): 173-184.
- [4] WANG M, LU M, HAO H, *et al.* Statistics of the self-mixing speckle interference in a laser diode and its application to the measurement of flow velocity [J]. *Optics Communication*, 2006, 260(1): 242-247.
- [5] HU X F. Effect of external cavity's feedback light on state density of photon in internal cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2684-2689(in Chinese).
- [6] SHINOHARA S, MOCHIZUKI A, YOSHIDA H, *et al.* Laser Doppler velocimeter using the self-mixing effect of a semiconductor laser diode [J]. *Applied Optics*, 1986, 25(9): 1417-1419.
- [7] KOELINK M H, SLOT M, de MUL F F M, *et al.* Laser Doppler velocimeter based on the self-mixing effect in a fiber-coupled semiconductor laser: theory [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(18): 3401-3408.
- [8] JENTINK H W, de MUL F F M, SUICHIES H E, *et al.* Small laser Doppler velocimeter based on the self-mixing effect in a diode laser [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(2): 379-385.
- [9] OZDEMIR S K, ITO S, SHINOHARA S, *et al.* Correlation-based speckle velocimeter with self-mixing interference in a semiconductor laser diode [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(33): 6859-6865.
- [10] LIU Sh G, LI Z R, LIU Q. Feasibility study of all-fiber self-mixing speckle interference [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(3): 316-319(in Chinese).
- [11] YU Y G, GUO Ch Y, YE H Y. Vibration measurement based on moderate optical feedback self-mixing interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(8): 1430-1434(in Chinese).
- [12] HU X F. Reconstruction of vibration signal from laser diode self-mixing interference signal [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(6): 1498-1502(in Chinese).
- [13] HU X F. Observation and analysis on self-mixing interference of multi-longitudinal mode laser diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 432-439(in Chinese).
- [14] CHURNSIDE J H. Laser Doppler velocimetry by modulating a CO₂ laser with backscattered light [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(1): 61-66.
- [15] ACKET G, LENSTRA D, BOET A D, *et al.* The influence of feedback intensity on longitudinal mode properties and optical noise in index-guide semiconductor lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1984, 20(10): 1163-1169.
- [16] HU X F. Calculation analysis and experimental observation on laser diode self-mixing interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6): 1111-1116(in Chinese).
- [17] LIU Sh G, LI Z R, LIU Q. The study of self-mixing interference signal processing based on time-frequency analysis [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(6): 626-629(in Chinese).
- [18] HUANG W, LÜ L, GU H Q, *et al.* Analysis on the laser self-mixing vibration signal transmitted through optical fiber [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(1): 50-53(in Chinese).
- [19] de GROOT P J. Range-dependent optical feedback effects on the multimode spectrum of laser diodes [J]. *Journal of Modern Optics*, 1990, 37(7): 1199-1214.

(上接第28页)

法具有很好的应用前景,为下一步实现3维立体图的实时计算全息图研究奠定了良好的技术基础。

参 考 文 献

- [1] YU Z L, JIN G F. Computer generated hologram [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1984: 1-22(in Chinese).
- [2] ABOOKASIS D, ROSEN J. Three types of computer-generated hologram synthesized from multiple angular viewpoints of a three-dimensional scene [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(25): 6533-6538.
- [3] YOSHIKAWA N, YATAGAI T. Interpolation method for computer-generated holograms using random phase technique [J]. *Optical Review*, 1999, 6(5): 433-438.
- [4] WANG H, LI Y, JIN H Zh, *et al.* Visualization using computer generated hologram (CGH) based on three-dimensional shape measurement data of object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(3): 284-288(in Chinese).
- [5] LI Y, WANG H, YING Ch F, *et al.* Research of the computer-generated rainbow hologram with large viewing angle [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(5): 595-597(in Chinese).
- [6] SHI Y L, WANG H, LI Y. Practical method for color computer-generated rainbow holograms of real-existing objects [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(21): 4219-4226.
- [7] SHIMOBABA T, ITO T. An efficient computational method suitable for hardware of computer-generated hologram with phase computation by addition [J]. *Computer Physics Communications*, 2001, 13(8): 44-52.
- [8] ITO T, MASUDA N, YOSHIMURA K, *et al.* Special-purpose computer HORN-5 for a real-time electroholography [J]. *Optics Express*, 2005, 13(6): 1923-1932.
- [9] SHIMOBABA T, HISHINUMA S, ITO T, *et al.* Special-purpose computer for holography HORN-4 with recurrence algorithm [J]. *Computer Physics Communications*, 2002, 14(8): 160-170.
- [10] ICHIHASHI Y, NAKAYAMA H, ITO T, *et al.* HORN-6 special-purpose clustered computing system for electroholography [J]. *Optics Express*, 2009, 17(16): 13895-13903.
- [11] ZHANG Q Sh. Studies of synthetic aperture method in digital holography based on gray correlation algorithm [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(3): 276-279(in Chinese).