

离轴数字全息波前重建算法讨论

李俊昌^{1,2} 宋庆和^{1,2} Picart Pascal^{2,3} 桂进斌¹ 楼宇丽¹

¹ 昆明理工大学理学院, 云南 昆明 650093

² LAUM, CNRS, Université du Maine, Av. O. Messiaen, 72085 LE MANS, France

³ ENSIM-École Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans, rue Aristote, 72085 LE MANS, France

摘要 在离轴数字全息的应用研究中,将数字全息图视为单位振幅平面波照射下的光波场,利用 1 次快速傅里叶变换(FFT)计算菲涅耳衍射积分是最流行的物光波前重建方法(简称 1-FFT 法)。然而,用球面波为重建波,利用像平面滤波技术及角谱衍射理论,存在需要 4 次 FFT 的另一种波前重建方法(简称 FIMG4FFT 法)。基于快速傅里叶变换理论对这两种方法进行研究。结果表明,尽管 FIMG4FFT 重建方法需要进行 4 次 FFT 计算,却能用较少的计算资源高效率地重建同等质量的物光场。为便于实际应用,详细给出 FIMG4FFT 方法在彩色数字全息图像重建及物体微形变检测中的应用实例。

关键词 全息; 彩色数字全息; 波前重建; 计算数字全息检测

中图分类号 O438.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0209008

Discussion of Wavefront Reconstruction Algorithm of Off-Axis Digital Holography

Li Junchang^{1,2} Song Qinghe^{1,2} Picart Pascal^{2,3} Gui Jinbin¹ Lou Yuli¹

¹ Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China

² LAUM, CNRS, Université du Maine, Av. O. Messiaen, 72085 LE MANS, France

³ ENSIM-École Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans, rue Aristote, 72085 LE MANS, France

Abstract In the study of off-axis digital holography, digital hologram may be considered as a light wave field which is illuminated by the unit amplitude plane wave. The Fresnel diffraction integral can be calculated by only one fast Fourier transform (FFT). It is the most popular method of wavefront reconstruction (called 1-FFT). However, applying the spherical wave as the reconstruction wave, there is another method of wavefront reconstruction using the angular spectral diffraction theory and image plane filtering. This method requires four fast Fourier transforms (called FIMG4FFT). Two methods are researched based on the fast Fourier transform theory. The result demonstrates that the FIMG4FFT method needs four FFTs, but it can use less computation resource to reconstruct the equivalent quality object wave field. Finally, the application examples of the FIMG4FFT method are shown in detail in the reconstruction of color digital holograms and micro deformation detection.

Key words holography; color digital holography; wave front reconstruction; digital holography detection

OCIS codes 090.1970; 090.1995; 090.2880; 090.5694

1 引言

随着计算机及电荷耦合器件(CCD)技术的进步,20 世纪出现的数字全息^[1-2]逐步成为国内外的一个研究热点^[3-12]。由于 CCD 像素及面阵尺寸与

传统感光材料有较大差距,如何利用 CCD 记录的数字全息图高质量地重建物光场是数字全息的基本研究课题。

根据标量衍射理论^[13],物光场的波前重建可用

收稿日期: 2013-10-08; 收到修改稿日期: 2013-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(60977007)

作者简介: 李俊昌(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事信息光学理论及计算等方面的研究。

E-mail: jcli99@163.com

多种形式的衍射公式进行计算,衍射的傍轴近似解——菲涅耳衍射积分是最常用的计算公式。在离轴数字全息波前重建研究中,由于菲涅耳衍射积分能够表示为傅里叶变换及卷积的形式,当表示成傅里叶变换时可以用一次快速傅里叶变换(FFT)进行计算。将数字全息图视为单位振幅平面波照射下的光波场,利用一次FFT计算菲涅耳衍射重建物光场是广泛采用的方法^[14](简称1-FFT法)。然而,1-FFT法重建图像的物理尺寸是光波长的函数,当进行彩色图像重建或多种波长光束照明的彩色数字全息检测时,不同色光重建图像的尺寸不相同,必须采用不同的方法统一重建图像的尺寸^[7-9]。在解决这个问题研究进程中,令重建光为球面波,引入像面滤波技术,提出利用衍射的角谱理论进行物光波前重建的另一种方法(简称FIMG4FFT方法)^[15-19]。但是,完成一次波前重建计算,需要实施4次FFT计算。

应用研究中,用较少的计算机资源高效率地重建物光场是一个重要的研究目标。本文基于快速傅里叶变换理论^[20]对1-FFT及FIMG4FFT重建方法进行比较研究,研究相同实验条件下重建同等质量物光场时两种方法需要占用的计算机资源及计算时间。为便于FIMG4FFT方法的实际应用,详细给出了彩色图像重建及物体微形变的彩色数字全息检测实例。

2 两种波前重建方法

2.1 1-FFT 波前重建方法

在全息记录系统中建立直角坐标系 $Oxyz$,令 $z = -z_0$ 为物平面,记录全息图的平面是 $z = 0$ 平面,CCD记录的全息图为 $I_H(x, y)$ 。将数字全息图视为单位振幅平面波照射下的光波场,重建像平面的光波场可用菲涅耳衍射积分表为^[14]

$$U(x, y) = \frac{\exp(jkz_0)}{j\lambda z_0} \exp\left[\frac{jk}{2z_0}(x_i^2 + y_i^2)\right] \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ I_H(x, y) \exp\left[\frac{jk}{2z_0}(x^2 + y^2)\right] \right\} \exp\left[-j2\pi\left(\frac{x_i}{\lambda z_0}x + \frac{y_i}{\lambda z_0}y\right)\right] dx dy, \quad (1)$$

式中 $j = \sqrt{-1}$, λ 为光波长, $k = 2\pi/\lambda$ 。

若全息图的宽度为 L , 取样数为 N , 当利用FFT计算(1)式时,1-FFT重建像平面的宽度为^[14,17]

$$L_0 = \lambda z_0 N / L. \quad (2)$$

由于重建平面上同时存在零级衍射光及共轭物光,应合理设计参考光的投射角,让物体的宽度 D_0 满足^[14]

$$D_0 \leq L_0 / 4, \quad (3)$$

才能重建不受干扰的物光场。

2.2 FIMG4FFT 波前重建方法

利用(1)式获得1-FFT重建像平面后,在像平面上截取不受干扰的物体像,在像周围补零得到只包含物体像的像平面(即像面滤波^[19]),利用距离 z_0 的衍射逆运算可以获得 $z=0$ 平面上无干扰的数字全息图。设重建波为波面半径 z_c 的沿光轴传播的球面波:

$$R_c(x, y) = \exp\left[\frac{jk}{2z_c}(x^2 + y^2)\right]. \quad (4)$$

在重建波照射下,透过无干扰的数字全息图的光波经距离 z_i 传播后的光波场用角谱衍射公式可表示为

$$U_i(x, y) = F^{-1} \left\{ F[\omega(x, y)U^*(x, y)R_c(x, y)] \exp\left[jkz_i \sqrt{1 - \lambda^2(f_x^2 + f_y^2)}\right] \right\}, \quad (5)$$

式中 $\omega(x, y)$ 为全息图的窗口函数, $U^*(x, y)$ 为与像面上截取的物体像所对应的 $z = 0$ 平面的物光场, f_x, f_y 为与 x, y 对应的频域坐标。

若 z_r 为记录全息图时的参考光波面半径,当衍射距离 z_i 满足

$$z_i = \left(\frac{1}{z_0} - \frac{1}{z_c} - \frac{1}{z_r}\right)^{-1}, \quad (6)$$

将得到放大率 $M = z_i/z_0$ 的像。利用FFT进行(5)式的计算时,重建像平面与初始平面的物理尺寸一致^[14],若能适当选择放大率,让 $MD_0 < L$, 则能让重建物光场落在重建平面内。理论研究指出^[19],若1-FFT像平面上像面滤波窗宽度为 N_s 像素,让放大率 M 满足

$$M = \frac{L^2}{\lambda z_0 N_s}, \quad (7)$$

则能让物体选择区域的像完整地显示于重建平面。

由于建立1-FFT重建像平面需要1次FFT计算,衍射逆运算获得无干扰数字全息图时需要1次逆FFT运算,计算(5)式时还需要2次FFT运算,FIMG4FFT重建算法共需要4次FFT运算。

3 两种方法计算速度的比较

鉴于(1)、(5)式均通过快速傅里叶变换求解,以下基于FFT计算理论对获得同等质量的物体像时两种方法的计算速度进行比较。

3.1 不同形式的FFT计算量

快速傅里叶变换有多种不同的算法,不同算法的计算量可以通过需要进行的实数乘法次数及实数

表1 取样数 N 表示成不同形式时的一维FFT计算量的比较

Table 1 Comparison of calculation amount of one-dimensional FFT for different N

	FFT algorithm	Number of real number multiplication	Number of real number addition
Base 2	$N=2^\gamma (\gamma=0,1,2,\dots)$	$(2\gamma-4)N+4$	$(3\gamma-2)N+2$
Base 4	$N=(2^2)^{\gamma/2} (\gamma/2=0,1,2,\dots)$	$(1.5\gamma-4)N+4$	$(2.75\gamma-2)N+2$
Base 8	$N=(2^3)^{\gamma/3} (\gamma/3=0,1,2,\dots)$	$(1.333\gamma-4)N+4$	$(2.75\gamma-2)N+2$
Base 16	$N=(2^4)^{\gamma/4} (\gamma/4=0,1,2,\dots)$	$(1.3125\gamma-4)N+4$	$(2.71875\gamma-2)N+2$

3.2 1-FFT及FIMG4FFT波前重建方法的计算量比较

快速傅里叶变换是离散傅里叶变换的一种快速算法^[17]。基于离散傅里叶变换理论,二维离散傅里

加法次数衡量^[20]。当取样数 N 表示为2、4、8及16的整数次幂时,对应的FFT计算方法简称为基2、基4、基8及基16算法,编程的复杂程度随基数的增加而增加,但计算量则随基数的增加而减小。令 γ 为正整数,表1给出不同形式取样数 N 的一维FFT需要的计算量^[20]。

叶变换及其逆运算事实上被分解为一维FFT进行计算。以离散函数 $f(x,y)$ ($x,y=0,1,2,\dots,N-1$)的离散傅里叶变换为例,其变换可以表示为^[21]

$$F(u,v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) W_N^{xu} W_N^{yv} = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \left[\sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) W_N^{yv} \right] W_N^{xu}, u,v = 0,1,2,\dots,N-1, \quad (8)$$

式中

$$W_N^{mm} = \exp\left(-j \frac{2\pi mm}{N}\right), W_N^{-mm} = \exp\left(j \frac{2\pi mm}{N}\right). \quad (9)$$

由于(8)式中括号内的离散傅里叶变换可以用一维FFT计算,计算结束后,将计算结果视为新的函数,后续计算仍然是一维FFT的计算形式,因此,两种波前重建算法的计算速度可以用一维FFT的计算量进行比较。

对于1-FFT重建法,分析(2)、(3)式知,若全息

图的取样数为 $N \times N$,宽度为 D_0 的方形重建物光场最多只能由 $N/4 \times N/4$ 个取样点描述。当使用FIMG4FFT重建了 $N \times N$ 点的物光场时,为能用1-FFT重建法得到相同分辨率的物光场,必须通过全息图周边补零,形成 $4N \times 4N$ 取样数的全息图再进行计算^[17]。用基2FFT进行计算时,图1给出两种方法涉及的一维FFT计算量比较。由于常用CCD面阵宽度通常略大于1024 pixel,令 $\gamma=10$,即 $N=1024=2^{10}$,将重建图像用 1024×1024 点描述是便于实际应用的分辨率。这样,为让1-FFT重建像

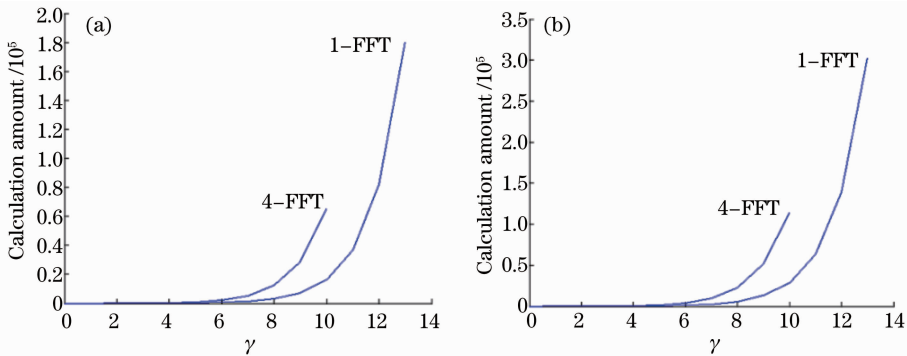


图1 一维基2FFT的1次FFT与4次FFT计算量比较。(a)乘法次数比较;(b)加法次数比较

Fig. 1 Comparison of calculation amount between 1-FFT and 4-FFT for $N=2^\gamma$.

(a) Comparison of multiplication; (b) comparison of addition

具有相同分辨率,1-FFT 重建平面宽度应为 $4N = 4096 = 2^{12}$,即 $\gamma = 12$ 。根据图 1 知,在这种情况下 1-FFT 法重建图像的计算量大于 FIMG4FFT 法。

利用类似的方法,原则上可以立足于基 4、基 8 及基 16 的 FFT 算法对两种波前重建算法的计算量再作讨论。然而,当使用基 4、基 8、基 16 算法进行波前计算时,为让全息图的取样数 N 是相应基数的整数次幂,通常需要进行全息图周边补零或部分删除全息图的处理。由于相邻 γ 的允许取值(见表 1)让取样数的变化量十分庞大,很多情况下常用微机内存不能容纳计算时需要的数组,失去实际意义。鉴于基 2 的 FFT 算法是最常用的算法,不再基于其余几种 FFT 算法进行详细讨论。以下,通过实验验证上述结论。

4 彩色数字全息波前重建实验

4.1 全息图记录系统

图 2 是能够同时记录红绿蓝三种色光全息图的光学系统,PBS 为分束镜,SF 为玻璃镜片型号^[17]。由于三种色光能有效分离,照明物光及参考光共用一个光路。实验所用物体是高度约 40 mm 的中国京剧脸谱彩陶模型,彩色 CCD 像素数 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,像素宽度为 $6.45 \mu\text{m}$ 。物体到 CCD 的距离为 2000 mm,红绿蓝三激光波长分别为 671, 532, 457 nm。

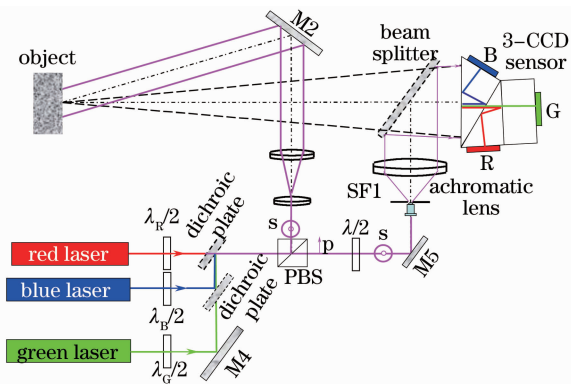


图 2 彩色 CCD 记录彩色数字全息图的实验系统
Fig. 2 Experimental system using a color CCD to record color digital hologram

基于对全息图补零的 1-FFT 算法(简称补零 1-FFT 法)及 FIMG4FFT 算法,原则上均能重建统一尺寸的物体真彩色图像。然而,在常用 2 GB 内存的微机上使用 Matlab 编程计算立即发现,为能用 1024×1024 的取样数描述重建图像,补零 1-FFT 法

因数组太大($4N \times 4N = 4096 \times 4096$)不能运行。为便于在同条件下对两种计算方法作比较,从实验测得的全息图中央载取出 512×512 点的全息图,分别用补零 1-FFT 法及 FIMG4FFT 法进行重建研究。

4.2 补零 1-FFT 法重建

对 512×512 点全息图周边补零,让红绿蓝三种色光分别形成 $N_R \times N_R = 2048 \times 2048$ 、 $N_G \times N_G = 1638 \times 1638$ 及 $N_B \times N_B = 1394 \times 1394$ 的补零全息图^[17]。由于补零数为整数,对三种色光均用距离 z_0 重建时,重建像的像素物理宽度不准确一致。基于重建像焦深的讨论^[22],为让重建场像素物理尺寸充分统一,可令红光重建距离为 z_0 ,绿光及蓝光重建距离分别是微弱偏离像平面但仍然在焦深范围内的距离 z_{0G} 、 z_{0B} ,即让绿光及蓝光重建距离满足

$$\frac{\lambda_R z_0}{N_R} = \frac{\lambda_G z_{0G}}{N_G} = \frac{\lambda_B z_{0B}}{N_B}. \quad (10)$$

在三种色光的 1-FFT 重建平面上取出 512×512 点的物体图像。将三种色光重建像强度视为真彩色图像的三基色分量,利用计算机即能获得物体的真彩色图像。

以红光重建为例,图 3(a)给出通过补零后形成的 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 的全息图,1-FFT 重建像平面示于图 3(b)。在图 3(b)选出 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 描述的重建像,其强度图像即可作为重建彩色像的红色分量。

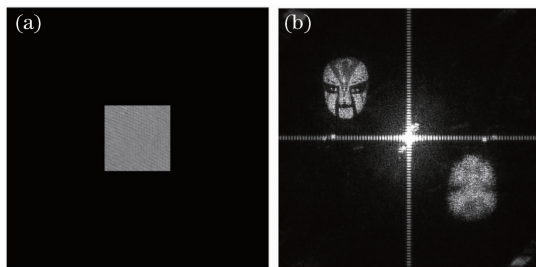


图 3 补零的红光全息图及 1-FFT 重建像平面 ($2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$)。(a) 补零的红光全息图;(b) 1-FFT 重建像平面

Fig. 3 Hologram of red light after zero-padding and 1-FFT reconstructed image plane ($2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$). (a) Hologram of red light after zero-padding; (b) 1-FFT reconstructed image plane

按照类似步骤求出绿色及蓝色光的分量后,图 4 给出补零 1-FFT 方法重建的彩色分量图像及合成的彩色图像。

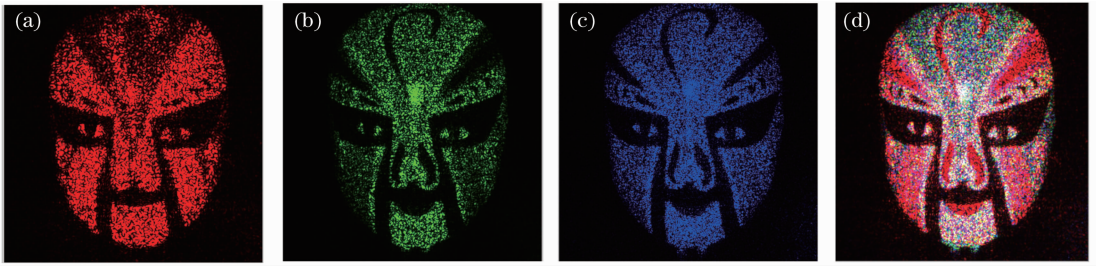


图4 补零 1-FFT 方法重建的图像(512 pixel×512 pixel)。(a) 红色分量；(b) 绿色分量；(c) 蓝色分量；(d) 彩色图像

Fig. 4 1-FFT reconstructed image by zero-padding (512 pixel×512 pixel). (a) Red component; (b) green component; (c) blue component; (d) color image

4.3 FIMG4FFT 法重建

令 $L=512 \times 0.00645$ mm, $N_s=128$ 及 $\lambda=\lambda_R$, 代入(7)式求得放大率 $M=0.0635$ 。于是重建距离 $z_i=Mz_0=126.98$ mm, 再利用(6)式求得重建波的

波面半径 $z_c=-135.59$ mm。基于上述参数,由(5)式重建的图像三基色分量示于图 5(图中的 1-FFT 重建像平面上用浅色框示出像面滤波窗)。

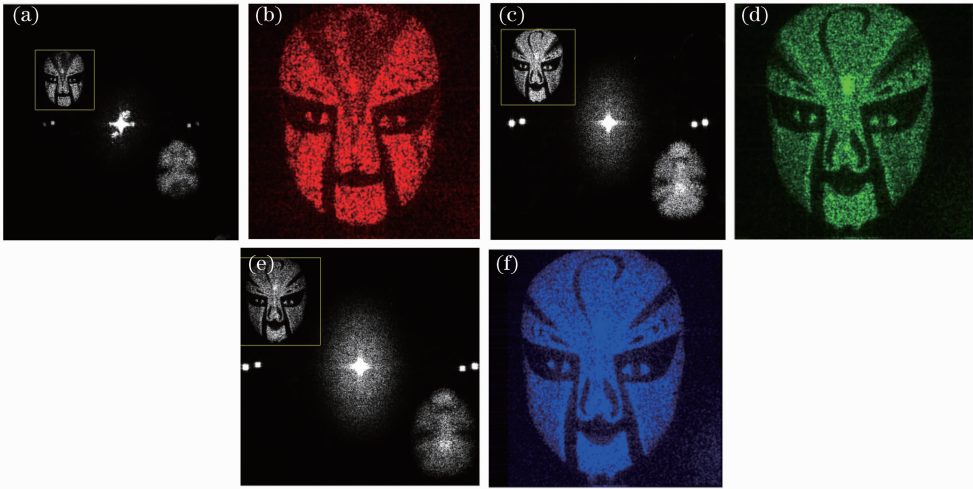


图5 利用 FIMG4FFT 方法重建的图像三基色分量(512 pixel×512 pixel)。(a) 红光 1-FFT 重建像平面；(b) 重建像的红色分量；(c) 绿光 1-FFT 重建像平面；(d) 重建像的绿色分量；(e) 蓝光 1-FFT 重建像平面；(f) 重建像的蓝色分量

Fig. 5 Image tricolor components reconstructed by FIMG4FFT algorithm (512 pixel×512 pixel). (a) 1-FFT reconstructed image plane of red light; (b) red component of reconstructed image; (c) 1-FFT reconstructed image plane of green light; (d) green component of reconstructed image; (e) 1-FFT reconstructed image plane of blue light; (f) blue component of reconstructed image

基于图 5 的结果, FIMG4FFT 方法重建的真彩色图像示于图 6(a)。为便于与补零 1-FFT 方法重建图像作比较,图 6(b)给出补零 1-FFT 方法重建的真彩色图像。可以看出,两种方法重建图像质量没有区别。但是,根据在同一计算机上计算时间的统计,补零 1-FFT 方法的重建计算时间是 FIMG4FFT 法的 1.5 倍,与图 1 预见的情况基本一致。

5 彩色数字全息检测应用实例

基于 FIMG4FFT 方法,现进行实时彩色数字全息检测实验。被检测对象是一电路板插件(见图 7)。受厂家委托检测在插件安装过程中电路板表面

的微形变,以期研究该电路板在实际使用时产生裂纹的原因。为此,专门设计了电路板插入插座后安装紧固螺钉的模拟装置,使用波长为 632.8 nm 的红色激光及 532 nm 的绿色激光照明物体,两照明光分别从物体左右两侧投向物体。利用双曝光法研究电路板安装过程中安装孔周围区域沿水平及垂直于板面方向的微形变动态分布^[23-24]。

图 8 是实验研究光路,来自两激光器的激光分别射入分束镜 PBS1 及 PBS2,被分束镜分别反射的两束光,通过扩束、准直及反射后,沿两个不同方向照亮物体局部区域,由物体表面散射并沿 z 轴附近传播的光波通过半反半透镜 BS2 到达 CCD 形成

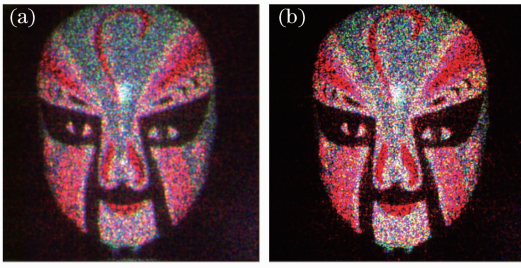


图 6 用 FIMG4FFT 与补零 1-FFT 方法重建的真彩色图像比较(512 pixel×512 pixel)。(a) FIMG4FFT 方法；(b) 补零 1-FFT 方法

Fig. 6 Comparison between color images by FIMG4FFT algorithm and 1-FFT algorithm after zero-padding (512 pixel × 512 pixel). (a) FIMG4FFT algorithm; (b) 1-FFT algorithm after zero-padding

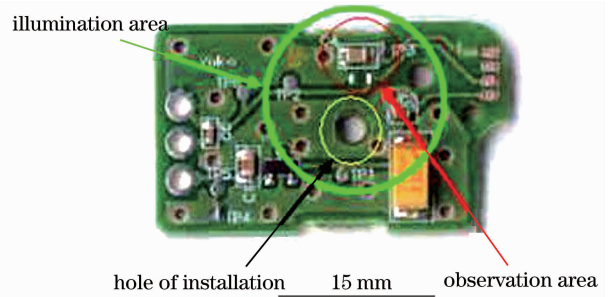


图 7 电路插件的照明区及观测区

Fig. 7 Illumination area and observation area of pinboard of circuit

物光。透过 PBS1 及 PBS2 的光波经系统的相关元件扩束及准直后,被 BS2 反射投向 CCD 形成参考光。物体到 CCD 的距离 $d=908\text{ mm}$,单色 CCD 像素宽度为 0.00465 mm ,使用 $N \times N=1024\text{ pixel} \times 1024\text{ pixel}$ 的全息图进行波前重建研究。

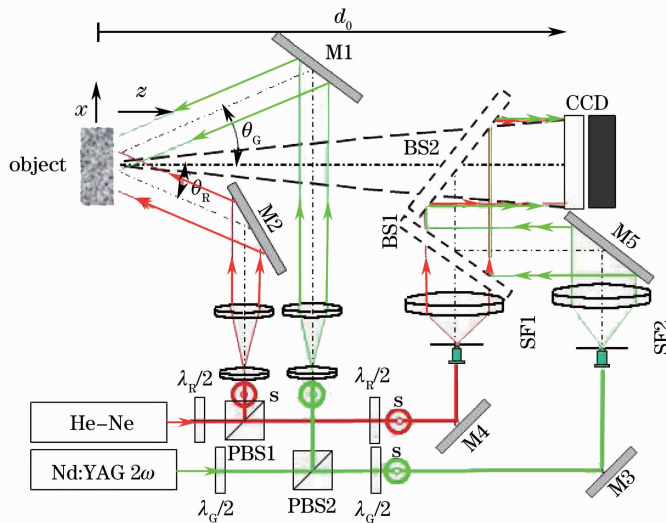


图 8 双激光照明的数字全息记录系统

Fig. 8 Digital holographic recording system illuminated with two lasers

为使用单色 CCD 同时记录不相互干扰的两种色光的全息图,调整参考光,让绿光及红光的 1-FFT 重建像分别在重建平面的第一及第二象限。在电路板的模拟安装过程中,记录了 90 幅全息图。利用相邻时间间隔的两幅全息图处理后,图 9 给出能体现双曝光数字全息检测过程的几幅图像。其中,图 9 (a)和(d)是利用一幅全息图获得的红光及绿光的 1-FFT 重建像平面,像平面上的滤波窗用浅色方形框表示(红光的滤波窗大小为 $168\text{ pixel} \times 168\text{ pixel}$,

绿光窗口大小为红光的 λ_r/λ_g 倍,即 $200\text{ pixel} \times 200\text{ pixel}$);图 9 (b)和(e)分别是 FIMG4FFT 重建像强度图像;利用相邻时刻红绿两色光的重建像的光波场,以 2π 为模的干涉图像示于图 9 (c),(f)。

通过对干涉图的相位解包裹^[10]便能获得两观测时刻间物体沿水平及垂直两个方向的微形变,对所有全息图依次处理后则获得观测时间范围内观测区域的动态形变过程。

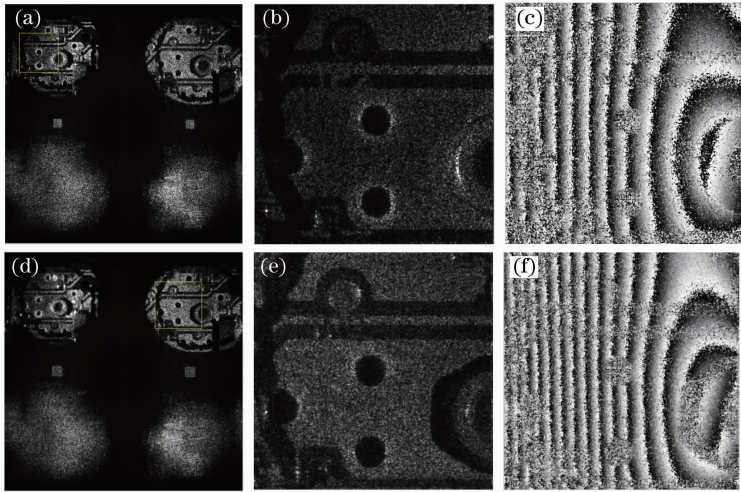


图9 基于FIMG4FFT的双曝光双彩色数字全息检测图像(1024 pixel \times 1024 pixel)。(a)红光1-FFT重建平面；(b)红光局域重建像；(c)红光干涉图像；(d)绿光1-FFT重建平面；(e)绿光局域重建像；(f)绿光干涉图像

Fig. 9 Digital holographic detection images using double-exposure by FIMG4FFT (1024 pixel \times 1024 pixel). (a) 1-FFT reconstructed image plane of red light; (b) reconstructed local image of red light; (c) interference image of red light; (d) 1-FFT reconstructed image plane of green light; (e) reconstructed local image of green light; (f) interference image of green light

6 讨 论

在前面比较两种重建方法在同等条件下重建同一质量图像时计算量的区别时,由于2 GB内存的常用微机不能执行Matlab程序,只使用了512 pixel \times 512 pixel的全息图进行讨论。在应用研究中,常用的CCD探测器的取样数通常略大于1024 pixel \times 1024 pixel,利用 $N=1024$ 的FFT计算通常能够充分利用全息图获取的信息。对于补零1-FFT重建,三种色光的补零取样数均大于1024 pixel \times 1024 pixel,可以在CCD记录的整个全息图周边补零,重建出512 pixel \times 512 pixel的质量较好的物光场。然而,如果使用FIMG4FFT方法利用1024 pixel \times 1024 pixel的全息图重建,则能得到1024 pixel \times 1024 pixel的高质量物光场。对于

彩色图像显示及数字全息检测,能够用较多的像素高分辨率地表示同一尺寸的观测物是通常追求的目标。作为实例,图10(a)给出用图2所示实验装置测量的全息图重建的物体图像,其计算时间微高于补零1-FFT方法(差别不超过1/10的计算时间),但占用计算机的内存资源则显著低于补零1-FFT方法,即FIMG4FFT方法仍然比补零1-FFT方法优越。

值得注意的是,FIMG4FFT方法可以对物体的任意局部区域进行高分辨率的显示。例如,实验中在像面滤波时选择128 pixel \times 128 pixel或64 pixel \times 64 pixel滤波窗进行重建,可以得到1024 pixel \times 1024 pixel的高质量局部物光场[见图10(b),(c)]。如果期望补零1-FFT重建这种分辨

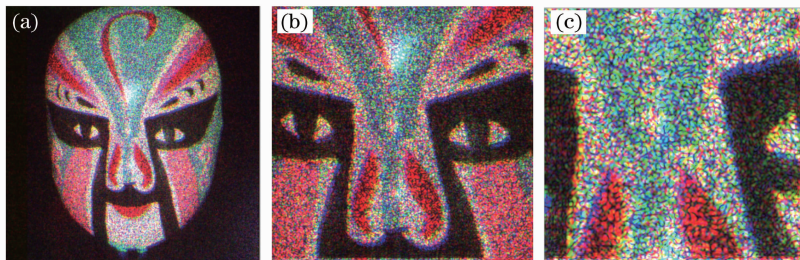


图10 用FIMG4FFT方法及不同宽度滤波窗重建的图像(1024 pixel \times 1024 pixel)。(a)256 pixel \times 256 pixel滤波窗；(b)128 pixel \times 128 pixel滤波窗；(c)64 pixel \times 64 pixel滤波窗

Fig. 10 Reconstruction with filters of different widths by FIMG4FFT algorithm (1024 pixel \times 1024 pixel).

(a) 256 pixel \times 256 pixel filter; (b) 128 pixel \times 128 pixel filter; (c) 64 pixel \times 64 pixel filter

率的局部图像,不但计算时间远远超过 FIMG4FFT 方法,而且基本不能在常用计算机上完成计算。

从图像处理的角度看,似乎可以通过不同的数学插值方法对图像进行放大处理,用较高的分辨率显示物体像。然而,理论研究指出^[25],来自物体表面的光波通常是相位随机取值的大量散射基元发出的光波,用没有物理意义的数学插值方法扩大的图像并不能真实体现物光场的分布,对于对相位特别敏感的光学检测无实际意义。

由于 FIMG4FFT 方法重建的不同分辨率的图像是严格按照衍射理论获得的(见图 10),故特别便于光学精密检测。例如,在上面的检测实例中,当用较大的像面滤波窗获得物体某一观测区域在绿光检测方向的形变分布后(见图 11),为对该区域中某一局部区域再作精细分析,可以选择较小的像面滤波窗再作研究(见图 12)。这种精细分析在常用微机上用补零 1-FFT 方法是不可能实现的。

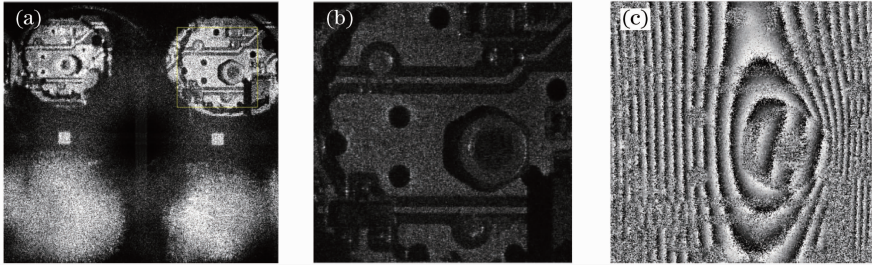


图 11 选择 300 pixel×300 pixel 的像面滤波窗的绿光检测图像(1024 pixel×1024 pixel)。

(a) 1-FFT 重建平面; (b) 局域重建像; (c) 干涉图像

Fig. 11 Detection image of green light with image plane filter of 300 pixel×300 pixel (1024 pixel×1024 pixel).

(a) 1-FFT reconstructed plane; (b) reconstructed local image; (c) interference image

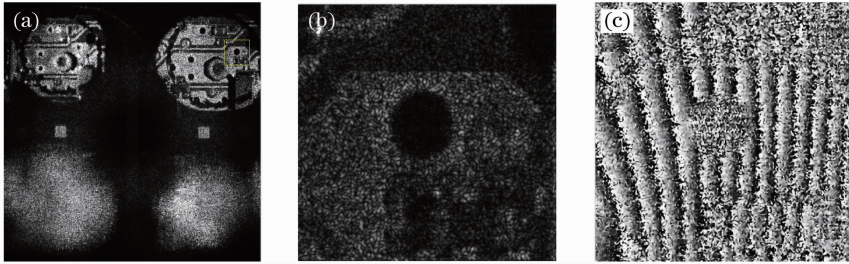


图 12 选择 100 pixel×100 pixel 的像面滤波窗的绿光检测图像(1024 pixel×1024 pixel)。

(a) 1-FFT 重建平面; (b) 局域重建像; (c) 干涉图像

Fig. 12 Detection image of green light with image plane filter of 100 pixel×100 pixel (1024 pixel×1024 pixel).

(a) 1-FFT reconstructed plane; (b) reconstructed local image; (c) interference image

7 结 论

通过理论分析及实验,对离轴数字全息应用研究中常用的补零 1-FFT 波前重建方法及近年来提出的 FIMG4FFT 重建法做了比较研究。研究结果表明,FIMG4FFT 方法能够用较少的计算机资源高质量地重建物光场,对于彩色图像显示或彩色数字全息检测,FIMG4FFT 方法更便于实际应用。

参 考 文 献

- 1 J W Goodman, R W Lawrence. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. Appl Phys Lett, 1967, 11 (3): 77-79.
- 2 T Huang. Digital holography[C]. Proc IEEE, 1971, 59(9): 1335-1346.

- 3 S Schedin, G Pedrini, H J Tiziani, *et al.*. Simultaneous three-dimensional dynamic deformation measurements with pulsed digital holography[J]. Appl Opt, 1999, 38(34): 7056-7062.
- 4 J M Desse, F Albe, J L Tribillon. Real-time color holographic interferometer[J]. Appl Opt, 2002, 41(25): 5326-5333.
- 5 I Yamaguchi, T Matsumura, J Kato. Phase shifting color digital holography[J]. Opt Lett, 2002, 27(13): 1108-1110.
- 6 Zhang F, Yamaguchi I. Algorithm for reconstruction of digital holograms with adjustable magnification[J]. Opt Lett, 2004, 29 (14): 1668-1670.
- 7 P Ferraro, S De Nicola, A Finizio, *et al.*. Recovering image resolution in reconstructing digital off-axis holograms by Fresnel-transform method[J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(14): 2709-2711.
- 8 Domenico A, Giuseppe C, Sergio D N, *et al.*. Method for superposing reconstructed images from digital holograms of the same object recorded at different distance and wavelength[J]. Opt Commun, 2006, 260(1): 113-116.
- 9 Zhao J L, Jiang H H, Di J L. Recording and reconstruction of a

- color holographic image by using digital lensless Fourier transform holography[J]. *Opt Express*, 2008, 16(4): 2514—2519.
- 10 Qian Xiaofan, Wang Zhanliang, Hu Te, *et al.*. Reconstructing the phase of wavefront using digital hologram and the principle of shearing interferometry[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(7): 1821—1826.
钱晓凡, 王占亮, 胡特, 等. 用单幅数字全息和剪切干涉原理重构光场相位[J]. *中国激光*, 2010, 37(7): 1821—1826.
- 11 Ouyang Liting, Wang Dayong, Zhao Jie, *et al.*. Experimental study on the phase-contrast imaging of the living hippocampal neuron cells by digital holographic microscopy[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0909001.
欧阳丽婷, 王大勇, 赵洁, 等. 老鼠大脑海马区神经元活细胞的数字全息相衬成像实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0909001.
- 12 Wang Huaying, Liu Feifei, Song Xiufa, *et al.*. Phase aberration compensation in pre-magnification digital micro-holography with equal-curvature object beam and reference beam[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0209001.
王华英, 刘飞飞, 宋修法, 等. 曲率物光和参考光预放大数字全息显微术中的相位畸变补偿[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0209001.
- 13 Joseph W Goodman. *Introduction to Fourier Optics (Third Edition)* [M]. New York: Roberts and Company Publishers, 2005.
- 14 Pascal Picart, Julien Leval. General theoretical formulation of image formation in digital Fresnel holography[J]. *J Opt Soc Am A*, 2008, 25(7): 1744—1761.
- 15 Li J C, Patrice T, Peng Z J, *et al.*. Digital holographic reconstruction of large objects using a convolution approach and adjustable magnification[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(5): 572—574.
- 16 Patrice Tankam, Pascal Picart, Denis Mounier, *et al.*. Method of digital holographic recording and reconstruction using a stacked color image sensor[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(3): 320—328.
- 17 Li Junchang. Introduction of digital color holographic wavefront reconstruction algorithm[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(5): 0501001.
李俊昌. 彩色数字全息波前重建算法概论[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0501001.
- 18 Li Junchang, Peng Zujie, Tankam Patrice, *et al.*. Digital holographic reconstruction of a local object field using an adjustable magnification[J]. *J Opt Soc Am A*, 2011, 28(6): 1291—1296.
- 19 Li Junchang, Song Qinghe, Gui Jinbin, *et al.*. Research of image plane filtering technique in digital holographic wavefront reconstruction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900135.
李俊昌, 宋庆和, 桂进斌, 等. 数字全息波前重建中的像平面滤波技术研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900135.
- 20 E O Brimelow. *Fast Fourier Transformation* [M]. Liu Qun transl. Shanghai: Shanghai Science and Technique Publishing House, 1979. 220.
E O 布赖姆. 快速富里叶变换[M]. 柳群译. 上海: 上海科学技术出版社, 1979. 220.
- 21 Ruan Qiuqi. *Digital Image Processing* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001. 80.
阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. 80.
- 22 Wang Huaying, Zhao Baoqun, Song Xiufa. Focal depth of Fresnel digital holographic imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 374—377.
王华英, 赵宝群, 宋修法. 菲涅耳数字全息成像系统的焦深[J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 374—377.
- 23 Tankam P, Song Q, Karray M, *et al.*. Real-time three-sensitivity measurements based on three-color digital Fresnel holographic interferometry[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(12): 2055—2057.
- 24 P Tankam. *Méthodes D'holographie Numérique Couleur Pour la Métrologie Sans Contact en Acoustique et Mécanique* [D]. Le Mans; Université du Maine, 2010.
- 25 Chen Jiabi, Su Xianyu. *The Application and Principle of Optical Information Technology (Second Edition)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009. 379.
陈家璧, 苏显渝. 光学信息技术原理及应用(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009. 379.

栏目编辑: 何卓铭