

一种相移合成孔径数字全息图高精度合成方法

李红燕 马志俭 钟丽云 吕晓旭

(华南师范大学信息光电子科技学院, 广东 广州 510006)

摘要 进行了相移合成孔径数字全息的分析与实验研究,分别给出了合成孔径数字全息和相移合成孔径数字全息的数学表述方法,提出一种用物光场强度图像与多步相移子全息图结合进行相移子孔径数字全息图的合成方法。先以物光场强度图像之间重叠区域的相关运算精确地确定子全息图之间的空间对接位置,在此基础上,再通过相移子全息图之间的重叠区域的相关运算进行相移同步匹配,实现了空间对接匹配与相移同步匹配的分离实施。以 $2^\#$ 分辨率板为物体进行了相应的实验研究,子全息图的空间对接匹配的相关系数和相移同步匹配的相关系数均超过了0.99,获得了高质量的再现像,证明了方法的可行性和优点。

关键词 光信息处理;数字全息术;合成孔径数字全息术;相移

中图分类号 TB877 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0509001

A High Precision Synthetic Method of Sub-Holograms in Phase-Shifting Synthetic Aperture Digital Hologram

Li Hongyan Ma Zhijian Zhong Liyun Lü Xiaoxu

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

Abstract The mathematical expressions of synthetic aperture digital holography and phase-shifting synthetic aperture digital holography are presented. Based on the cross-correlation algorithm of both the object waves and the phase-shifting sub-holograms, a high precision synthetic method of the sub-holograms in phase-shifting synthetic aperture digital holography is proposed. Firstly, the position relation of the sub-holograms is determined by the cross-correlation algorithm of the adjacent object waves, then phase-shifting synchronization matching is implemented by the cross-correlation algorithm of the phase-shifting sub-holograms, thus it is convenient to reach the separation of the spatial connection matching of the sub-holograms and phase-shifting synchronization matching of the phase-shifting holograms. By use of the Chinese standard resolution test chart $2^\#$ as the experimental sample, the results show that the correlation coefficient of both the sub-holograms connection matching and phase-shifting synchronization are more than 0.99, and the reconstructed image with high quality is obtained.

Key words optical information processing; digital holography; synthetic aperture digital holography; phase-shifting
OCIS codes 090.1995; 070.0070; 110.1220; 050.5080

1 引言

提高分辨率是数字全息研究中的一个重要内容。通过缩短记录距离^[1]、合成孔径技术^[2]和借助透镜变换^[3]获得大孔径数字全息图,是获得高分辨率数字全息的三种基本方法。合成孔径数字全息是一种在不大幅度增加单个设备(系统)难度和复杂性情况下提高再现像分辨率和信噪比的方法,不仅可

以弥补图像采集芯片尺寸对提高分辨率的限制,而且还可以获得更长的记录距离和更大的视场。合成孔径数字全息图的记录过程中仍然需要满足采样定理,其再现像的分离,可以采用离轴记录方法^[4],也可以采用同轴记录方法与相移^[5]或外差^[2]技术结合的方法。合成孔径数字全息的记录方法有两类:一类是物光场直接记录法,另外一类是频域记录方法。

收稿日期: 2010-09-13; **收到修改稿日期**: 2010-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(60877070和60747001)资助课题。

作者简介: 李红燕(1984—),女,硕士研究生,主要从事数字全息技术方面的研究。E-mail: lhy23256@163.com

导师简介: 吕晓旭(1959—),男,博士,教授,主要从事光学相位测量和数字全息等方面的研究。

E-mail: xiaoxulu48@sina.com(通信联系人)

物光场直接记录法是将物光与参考光干涉场的一个截平面分为若干子平面,并分别用 CCD 记录下来成为子全息图,通过对相邻子全息图的重叠区域做相关运算确定其间相对位置,裁剪掉重叠区域后组成一幅合成数字全息图^[2,4,5]。合成孔径数字全息的频域记录方法,是物光场先经透镜变换后,记录其频谱面不同部分的数字全息图后再进行孔径合成^[2,6,7],文献[2]介绍了先把物体经过透镜变换,再通过频谱面上的光阑、二次变换透镜及 CCD 一起平移获得不同空间频率子数字全息图,然后合成后再再现获得再现像的方法;文献[6]和[7]介绍了一种在小数值孔径显微物镜焦面上记录不同空间频率频谱的全息图,再用这些全息图合成大数值孔径再现像的方法。合成孔径数字全息的再现像,既可以通过对整幅合成数字全息图再现获得^[2,4~6],也可以先得到子全息图再现像后再合成^[8,9],前者通过一次衍射计算即可获得合成的再现像,后者需要对各子全息图再现像进行平移后叠加得到合成再现像。目前数字全息应用研究仍然是一个受关注的问题^[10,11]。

本文介绍了一种近距离数字全息与合成孔径技术结合,同时采用相移技术进行再现像分离的近距离相移合成孔径数字全息方法,既可以保证以较少的子全息图得到大孔径数字全息图,又能发挥近距离数字全息光路结构紧凑和合成孔径数字全息工作距离长的优点。目前合成孔径数字全息中都是直接用子全息图进行相关运算或精确平移来实现对接,在近距离相移合成孔径数字全息中实现起来难度较大。本文提出了一种以物光场强度分布重叠区域的相关运算精确地确定子全息图之间的空间对接位置,并以此为基础保证相移子全息图之间的相移精确同步的方法,保证了近距离合成孔径数字全息对接精度的要求,减少相移子全息图之间的相移同步匹配过程的运算量。以 2[#] 鉴别率板作为物体,用本文提出的方法进行了相应的实验,结果表明,同一步相移子全息图重叠区域的最大归一化相关系数均超过 0.99,得到了高质量的再现像。

2 原 理

2.1 合成孔径数字全息图的表示

图 1 是采用同轴无透镜傅里叶变换光路记录合成孔径数字全息图的示意图。图中参考光为发光点位于物体中心的球面波,记录面上实线围成的内框表示子全息图,实线外框表示对接后的大全息图,虚线围成的图形表示对接前子全息图的重叠区域。

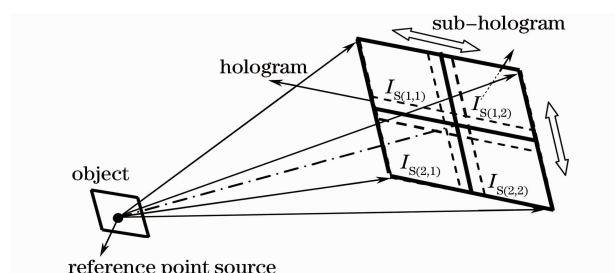


图 1 同轴无透镜傅里叶合成孔径数字全息图的记录原理示意图

Fig. 1 Schematic for recording on-axis lensless Fourier synthetic aperture digital hologram

记录平面 xy 上的物光场和参考光场分布分别以 $O(x, y)$ 和 $R(x, y)$ 表示, x 方向和 y 方向 CCD 的像素间隔分别为 Δx 和 Δy , 对应方向上第 (m, n) 幅子全息图在的像素数分别为 $Nx_{s(m,n)}$ 和 $Ny_{s(m,n)}$, 子全息图 $I_{s(m,n)}(x_i, y_j)$ 为

$$I_{s(m,n)}(x_i, y_j) = |O_{s(m,n)}(x_i, y_j) + R_{s(m,n)}(x_i, y_j)|^2, \quad (1)$$

式中 $x_i = i\Delta x, [i = 1, 2, \dots, Nx_{s(m,n)}], y_j = j\Delta y, [j = 1, 2, \dots, Ny_{s(m,n)}], O_{s(m,n)}(x_i, y_j)$ 和 $R_{s(m,n)}(x_i, y_j)$ 分别是形成子全息图的物光场和参考光场。

如果 x 方向和 y 方向子全息图的幅数分别为 M 和 N , 则 $m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N$, 所有子全息图组合成数字全息图的像素数为 $Nx = \sum_{m=1}^M Nx_{s(m,n)}$,

$$Ny = \sum_{n=1}^N Ny_{s(m,n)}$$

。为了保持合成数字全息图数学表达上的严格性,需要把子全息图的定义扩展到整个合成全息图大小,即把子全息图的大小扩展到 $Nx \times Ny$, 各子全息图在原来位置的值保持不变,其余部分的值均为零。扩展后的子全息图表示为

$$I'_{s(m,n)}(x_i, y_j) = \begin{cases} I_{s(m,n)}(x_i, y_j), & \left[\sum_{m'=1}^m Nx_{s(m',n)} - Nx_{s(m,n)} + 1 \right] \Delta x \leq x_i \leq \left[\sum_{m'=1}^m Nx_{s(m',n)} \right] \Delta x \\ \left[\sum_{n'=1}^n Ny_{s(m,n')} - Ny_{s(m,n)} + 1 \right] \Delta y \leq y_j \leq \left[\sum_{n'=1}^n Ny_{s(m,n')} \right] \Delta y \\ 0 & \text{others} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $x_i = i\Delta x, (i = 1, 2, \dots, N_x), y_j = j\Delta y, (j = 1, 2, \dots, N_y)$

为表达方便,以下仍用符号 $I_{s(m,n)}(x_i, y_j)$ 表示扩展前后的子全息图,子全息图所对应的物光场和参考光场也按扩展定义理解。这时合成数字全息图 $I_{SA}(x_i, y_j)$ 可以表示为

$$I_{SA}(x_i, y_j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{s(m,n)}(x_i, y_j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |O_{s(m,n)}(x_i, y_j) + R_{s(m,n)}(x_i, y_j)|^2. \quad (3)$$

用与记录参考光相同的数字再现光与合成孔径数字全息图相乘,即得到记录平面上的再现光场

$$A_{SA}(x_i, y_j) = I_{SA}(x_i, y_j)R(x_i, y_j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{s(m,n)}(x_i, y_j)R_{s(m,n)}(x_i, y_j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \{ |O_{s(m,n)}|^2 R_{s(m,n)} + |R_{s(m,n)}|^2 \times R_{s(m,n)} + O_{s(m,n)} |R_{s(m,n)}|^2 + O_{s(m,n)}^* R_{s(m,n)}^2 \}, \quad (4)$$

式中 * 表示共轭,为简明起见,省去坐标参量。(4)式中包含了背景光场、物光场及其共轭光场,其在物平面的数字衍射光场即为再现光场,包含物体的像、像的共轭光场及背景光场。

2.2 相移合成孔径数字全息图的表示

对于同轴数字全息方法记录的全息图,由(4)式得到的再现光场中,物体的像、像的共轭光场及背景光场是重叠在一起的,需要采用相移技术将物体的像分离出来。在合成孔径数字全息中,通过在每一幅子全息图记录中引入一个共同的相移量,每增加一次相移量就记录一幅该子全息图的相移全息图,同时需要保证同一相移量的各相移子全息图相移同步,就可以实现再现像的分离。采用四步相移方法时,对每一幅子全息图,均在参考光中分别引入相移量 $(0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$, 并记录对应的四幅相移子全息图,4幅相移子全息图对应的参考光场分布为

$$R_{s(m,n)}^{ps(k)}(x_i, y_j) = R_{s(m,n)}^{ps(0)}(x_i, y_j) \exp\left(jk \frac{\pi}{2}\right), \quad (k = 0, 1, 2, 3), \quad (5)$$

式中上标 ps 表示相移, k 表示相移的步数。对应的相移子全息图为

$$I_{s(m,n)}^{ps(k)}(x_i, y_j) = |O_{s(m,n)}|^2 + |R_{s(m,n)}^{ps(0)}|^2 + O_{s(m,n)} [R_{s(m,n)}^{ps(0)}]^* \exp\left(-jk \frac{\pi}{2}\right) + [O_{s(m,n)}^*] R_{s(m,n)}^{ps(0)} \exp\left(jk \frac{\pi}{2}\right), \quad (6)$$

相移合成数字全息图为

$$I_{SA}^{ps(k)}(x_i, y_j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{s(m,n)}^{ps(k)}(x_i, y_j), \quad (k = 0, 1, 2, 3), \quad (7)$$

将各相移数字全息图乘以记录时对应的模拟相移参考光后相加,得到记录面上的全息物光场分布为

$$A_{SA}^{ps}(x_i, y_j) = \left\{ \sum_{k=0}^3 I_{SA}^{ps(k)}(x_i, y_j) R_{s(m,n)}^{ps(k)}(x_i, y_j) \right\} / 4 = \left\{ \sum_{k=0}^3 \left[\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{s(m,n)}^{ps(k)}(x_i, y_j) R_{s(m,n)}^{ps(k)}(x_i, y_j) \right] \right\} / 4 = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N O_{s(m,n)}(x_i, y_j) |R_{s(m,n)}^{ps(k)}(x_i, y_j)|^2 = O(x_i, y_j) |R(x_i, y_j)|^2. \quad (8)$$

可见,由(8)式得到的物平面数字衍射光场中只有物体的像,其共轭光场及背景光场已经被消除。

2.3 基于物光场的子全息图对接和相移同步方法

当记录距离较小,系统的孔径角较大时,子全息图间的对接准确度对再现像质量有很大影响。另外,采用相移技术时,一方面对相移精度要求很高,另一方面,由于压电陶瓷的迟滞、蠕变和非线性,即使在相同驱动电压下,采集时也难以保证不同子全息图之间相移量的准确同步,而且直接用相移子全息图进行对接和相移同步计算,需要较大的运算量。

为解决上述问题,提出了一种利用物光场确定子全息图之间的重叠区域,实现子全息图之间准确对接,然后再通过多步相移实现相移同步的方法。方法包括子物光场强度图与相移子全息图采集及子全息图对接、相移同步和再现两个部分。采集过程按图2的流程进行,采集过程中相邻子全息图需要留出一定的重叠区域用于匹配。

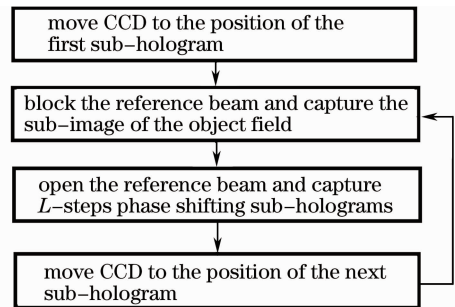


图2 物光场强度图及相移子全息图的记录过程

Fig. 2 Procedure for recording object field and phase-shifting sub-hologram

相邻两幅子全息图 A, B 的对接,可采用其物光场子图像重叠区域的相关运算进行,其方法如图3所示。在 A, B 两图中选择比实际重叠范围略大的区域,如图3(a)所示,从 B 图重叠区域内取出小于

重叠区域的部分图像为相关计算的掩模,将掩模在A图的预计重叠区域内做相关运算,相关系数最大时的位置,即是两图的对准位置,如图3(b)所示,他们与初始位置的差 $(\Delta x_i, \Delta y_j)$,是估计重叠区与实际重叠区的调整量,如图3(c)所示。依次执行图3的过程,即可完成所有子全息图的对接。

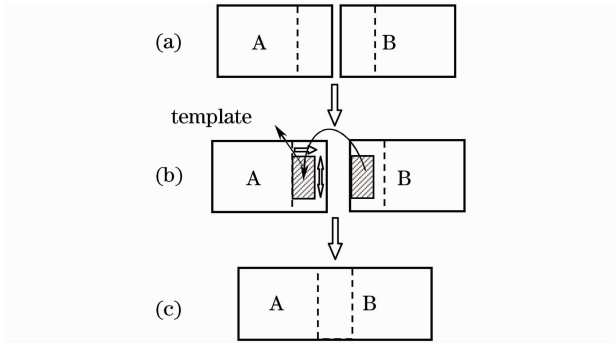


图3 子全息图对接方法示意图

Fig. 3 Schematic of sub-holograms connection

相移子全息图间的相移同步匹配是在物光场对接基础上进行的,此时只在已经确定的重叠区域内进行相移同步相关运算,而无需对接运算,可以大大减少运算量。为了保证能够获得同步相移的子全息图,可以对每一个子全息图都采集大大多于四步相移所需的相移全息图,再在其中进行匹配。如果在一个相移周期内采集 L 幅相移子全息图,同一子全息图的四步相移精度和子全息图之间的相移同步精度可以达到 $2\pi/L$ 。

在进行同步相移匹配之前,先标定出4幅标准四步相移子全息图,其顺序为 $k=0,1,2,3$,对应的相移量依次为 $(0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$ 。以此为基础,与相邻的 L 幅相移子全息图进行相移同步运算,运算分为图4所示的四个步骤。1) 从待同步的 L 幅相移子全息图中按 $l=0,1,2,\dots$ 的顺序读取相移子全息图,依次与标准的四步相移子全息图中 $k=0$ 的第一幅在重叠区域进行一次相关运算,相关系数最大的一幅即为与标准四步相移子全息图中 $k=0$ 一幅同步,这时记 $l=l_1$; 2) 从待同步的相移子全息图中剩余的 $L-l_1$ 幅中按 $l=l_1+1, l_1+2, l_1+3, \dots$ 的顺序取出相移子全息图,依次与标准四步相移子全息图中 $k=1$ 的第二幅在重叠区域进行一次相关运算,相关系数最大的一幅即为与标准四步相移子全息图中 $k=1$ 一幅同步,这时记 $l=l_2, \dots$ 。依此重复,得到两组同步的四步相移子全息图。不断更换待同步的相移子全息图,按上述4个步骤操作,即可完成所有的四步相移子全息图相移同步工作。

完成对接和各相移子全息图的相移同步后,经过裁剪和组合,构成如图5所示的四步相移合成数字全息图。利用(8)式,即可计算出记录面上全息物光场的分布,进而通过数字再现得到数字再现像。

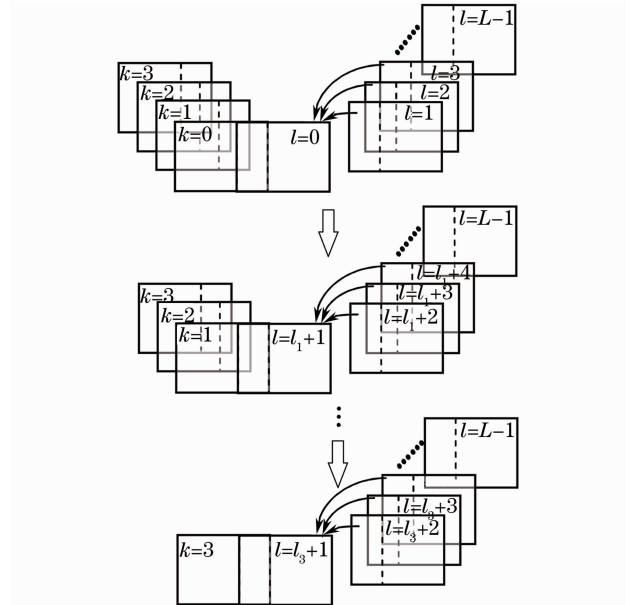


图4 相移子全息图的相移同步

Fig. 4 Synchronization between the phase-shifting holograms and the sub-holograms

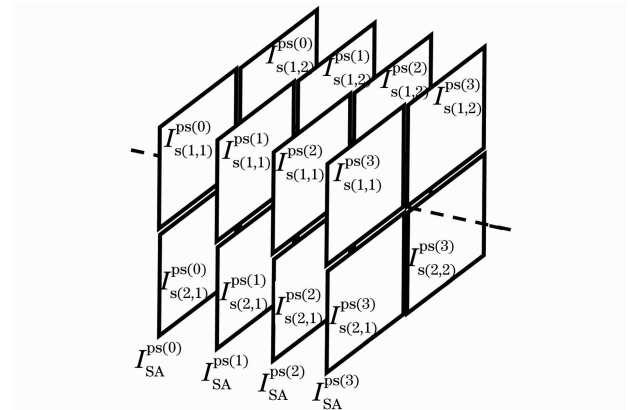


图5 四步相移合成数字全息图的示意图

Fig. 5 Schematic of four-step phase-shifting synthetic aperture digital hologram

3 实 验

采用相移同轴无透镜傅里叶变换光路进行合成孔径数字全息图记录,其基本结构为马赫-曾德尔干涉光路。同轴无透镜傅里叶变换光路可以保证近距离记录情况下满足采样定理要求,以更多地记录物光场的高频信息^[12];相移技术则用于消除再现像面的共轭像和背景光场,并获得高信噪比的再现像^[13]。从 He-Ne 激光器(波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$)发出

的激光由分束镜 BS_1 分为两束，一束由固定在压电陶瓷相移器(PZT)上的反射镜 M_1 反射后，通过显微物镜($40\times$, 数值孔径为 0.65)转换为发散的球面参考光,物镜的焦点处放有一个小孔空间滤波器;另一束光经透镜 L_1 ($f_1 = 4.5\text{ mm}$)和 L_2 ($f_2 = 190\text{ mm}$)构成的望远系统扩束后,经反射镜 M_2 反射后照射在物体上,经物体衍射形成物光。调整球面参考光发光点与物体所在平面中心重合,并经过分束镜 BS_2 的耦合后,在 CCD 面上干涉形成全息图。由计算机控制 PZT 对参考光相位调制,并控制 CCD 采集全息图。CCD 固定在一个具有水平和垂直平移功能的平移台上,供采集子全息图时移动之用。记录的光路如图 6 所示。

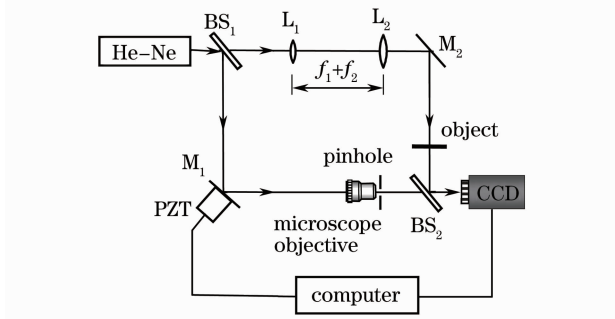


图 6 相移同轴合成孔径数字全息图的记录光路
Fig. 6 Experimental setup for recording on-axis phase-shifting synthetic aperture digital hologram

实验中所用物体为 $2^\#$ 鉴别率板,包含 25 组不同周期的光栅,其中第 25 组图案的周期最小,为 $d=10\ \mu\text{m}$,物体及参考光点源到 CCD 的距离均为 6 cm,CCD 的像素为 $768\ \text{pixel}\times 576\ \text{pixel}$,像素间隔为 $10\ \mu\text{m}\times 10.8\ \mu\text{m}$ 。按图 1 的布置及图 2 的顺序记录 4 组相移子全息图和相应的物光场,移动 CCD 时必须保证各子全息图位于同一平面上并与物体平面平行,相邻子图之间留有部分重叠区域,每种子全息图采集两个以上相移周期,每周期 140 幅相移全息图,相邻两幅相移子全息图间的相移量为 2.57° 。

先将采集到的子物光场按图 3 所示方法进行对接匹配,之后标定出第一组相移子全息图的四步相移子全息图,再按图 4 所示的方法与步骤进行相移子全息图之间的相移同步匹配。图 7 是从 300 幅相移子全息图中校正出来的四步相移子全息图,他们的物光不变,但每一幅的参考光相位比前一幅增加了 $\pi/2$ 。由相移量相同的相移子全息图合成出一幅相移合成数字全息图,共得到四幅四步相移合成数字全息图,他们的像素数均为 $1214\ \text{pixel}\times 1000\ \text{pixel}$,对接和相移同步匹配的相关系数都大于 0.99,达到了很高的精度。图 8 是经过对接和相移同步匹配后四步相移合成数字全息图中相移量为零的一幅,由 4 幅相移量为零的子全息图合成。图 9 是用 4 幅四步相移合成全息图,通过(8)式计算出的记录面上全息物光场的幅度分布,其信噪比得到了明显提高。图 10(a)

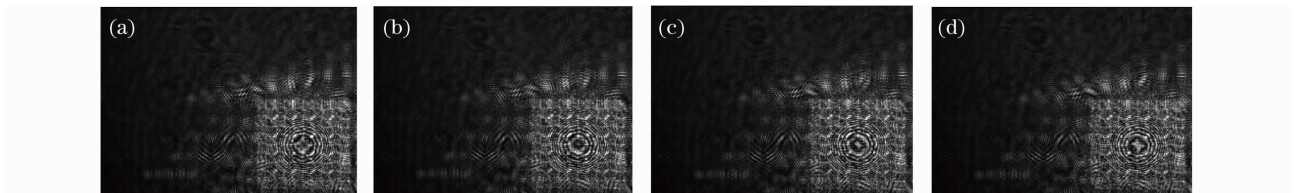


图 7 四步相移子数字全息图。相移量依次为(a)0,(b) $\pi/2$,(c) π ,(d) $3\pi/2$

Fig. 7 Four-step phase-shifting sub-holograms. phase-shifting amount are (a) 0, (b) $\pi/2$, (c) π , (d) $3\pi/2$ in sequence

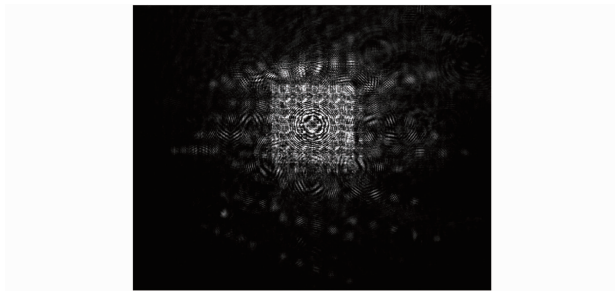


图 8 四步相移合成数字全息图中相移量为零的合成数字全息图

Fig. 8 Digital hologram with zero phase-shifting in four step phase-shifting synthetic digital hologramms

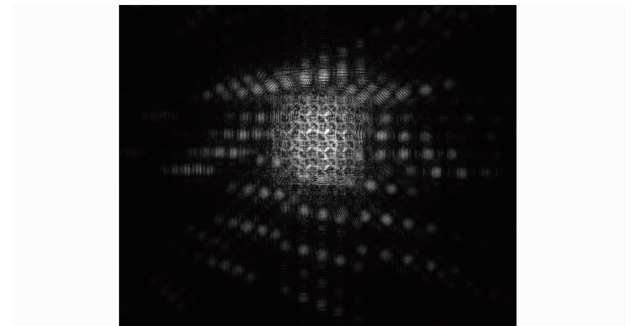


图 9 记录面上全息物光场的幅度分布

Fig. 9 Amplitude distribution of the holographic object wave field in the recording plane

是由图 9 所示全息物光场分布经过数字再现后得到的整个 $2^{\#}$ 鉴别率板的数字再现像, 范围约为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 图 10(b) 是图 10(a) 中第 25 组图案

的放大图像, 范围约为 $0.48 \text{ mm} \times 0.48 \text{ mm}$, 再现过程中进行了相位校正和强度增强。可以看出再现像达到了很高的质量。

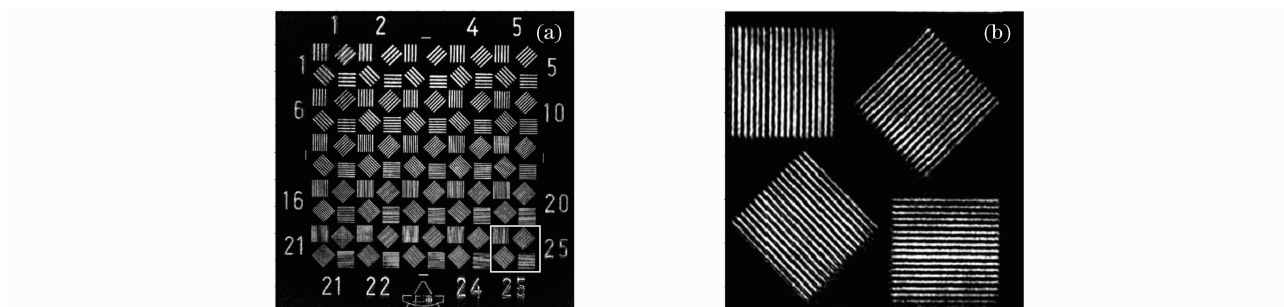


图 10 (a) $2^{\#}$ 鉴别率板的四步相移合成数字全息图再现像, (b) 图 10(a) 中第 25 组图案的放大图

Fig. 10 (a) Reconstructed image of $2^{\#}$ resolution test chart from four steps phase-shifting synthetic holograms, (b) enlarged image of the 25 th group pattern in Fig. 10(a)

4 结 论

在相移合成孔径数字全息中, 分别采集与子全息图对应的物光场强度图像和相移子全息图, 可以把相移子全息图的空间位置对接匹配和相移同步匹配分离开来, 先通过物光场强度图像重叠部分的相关运算实现子全息图的空间位置对接匹配, 在此基础上, 只需要按对接好的位置顺序在相移子全息图的重叠区域进行相关运算, 就可以得到空间位置匹配精度和相位同步性很高的相移合成孔径数字全息。通过实验验证了方法的可行性和高精度, 实际计算的空间位置匹配相关系数和相位匹配相关系数均大于 0.99, 在近距离相移合成孔径数字全息中尤为适用。

参 考 文 献

- 1 Y. Takaki, H. Ohzu. Fast numerical reconstruction technique for high-resolution hybrid holographic microscopy [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(11): 2204~2211
- 2 F. Le Clerc, M. Gross, L. Collot. Synthetic-aperture experiment in the visible with on-axis digital heterodyne holography[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(20): 1550~1552
- 3 E. Cuque, P. Marquet, C. Depeursinge. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(34): 6994~7001
- 4 Jürgen H. Massig. Digital off-axis holography with a synthetic aperture[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(24): 2179~2181
- 5 R. Binet, J. Colineau, J. Leheureau. Short-range synthetic aperture imaging at 633 nm by digital holography[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(23): 4775~4782
- 6 S. A. Alexandrov, T. R. Hillman, T. Gutzler *et al.*. Synthetic aperture Fourier holographic optical microscopy[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(16): 168102
- 7 T. R. Hillman, T. Gutzler, S. A. Alexandrov *et al.*. High-resolution, wide-field object reconstruction with synthetic aperture Fourier holographic optical microscopy [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(10): 7873~7892
- 8 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lu Xiaoxu. Recording and reconstruction of synthetic aperture digital holography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1207~1211
- 9 钟丽云, 张以谟, 吕晓旭. 合成孔径数字全息的记录、再现及实现[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10): 1207~1211
- 10 Jiang Hongzhen, Zhao Jianlin, Di Jianglei *et al.*. Reconstruction of synthetic digital lensless Fourier transform hologram by use of the screen-division method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3304~3309
- 11 姜宏振, 赵建林, 邸江磊 等. 合成孔径数字无透镜傅里叶变换全息图的分幅再现[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3304~3309
- 12 Zhang Yizhuo, Wang Dayong, Zhao Jie *et al.*. Investigation on phase unwrapping algorithms in digital holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3323~3327
- 13 张亦卓, 王大勇, 赵 洁 等. 数字全息中实用相位解包裹算法研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3323~3327
- 14 Lü Qieni, Zhao Chen, Ma Zhibin *et al.*. Digital holography experiment on the measurement of particle size and size distribution of diesel spray[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 779~783
- 15 吕且妮, 赵 晨, 马志彬 等. 柴油喷雾场粒子尺寸和粒度分布的数字全息实验[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 779~783
- 16 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lu Xiaoxu *et al.*. Analysis of the characteristics about the digital holography of the spherical reference wave [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1209~1213
- 17 钟丽云, 张以谟, 吕晓旭 等. 球面参考光波数字全息的一些特点分析及实验[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1209~1213
- 18 Lü Xiaoxu, Zhang Yimo, Zhong Liyun *et al.*. Analysis and experiment of phase-shifting coaxial lensless Fourier digital holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1511~1515
- 19 吕晓旭, 张以谟, 钟丽云 等. 相移同轴无透镜傅里叶数字全息的分析与实验[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1511~1515