第 24 卷 第 11 期
2004 年 11 月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 24, No. 11
November, 2004

文章编号：0253-2239(2004)11-1503-4

无透镜傅里叶变换全息图数值再现中的图像处理*

徐 莹 赵建林** 向 强 秦 川 范 琦

（西北工业大学应用物理系，西安 710072）

摘要： 针对无透镜傅里叶变换全息图数值再现过程的特点，提出了一套不同于以往的削弱或消除全息图 0 级衍射和孪生像的数字图像处理算法。该算法分为三步。首先，对所拍摄的数字全息图通过高通滤波实现衬比度增强预处理，以提高全息图的衍射效率并消除再现图像的 0 级衍射斑；其次，对再现图像进行带通及 V 型滤波，以降低背景噪声并使再现视场均匀；最后，对所得到的再现像进行平滑处理，通过小波滤噪和中值滤波进一步提高再现像的信噪比。实验结果表明，该方法只需记录一幅数字全息图，通过简单的数字图像处理，便可明显改善图像质量，尤其适用于无透镜傅里叶变换全息图的数值再现，并且更加实用化。

关键词： 数字全息术；无透镜傅里叶变换全息术；衬比度增强；带通滤波；V 型滤波

中图分类号：TN247　　文献标识码：A

Image Processing in Numerical Reconstruction for Lensless Fourier Transform Hologram

Xu Ying　Zhao Jianlin　Xiang Qiang　Qin Chuan　Fan Qi

(*Department of Applied Physics*, *Northwestern Polytechnical University*, *Xi'an* 710072)

(Received 18 July 2003; revised 30 December 2003)

Abstract: Based on the characteristics of numerical reconstruction for lensless Fourier transform hologram, a set of digital image processing algorithm is presented to eliminate zero diffraction component and "twin image". This method is different from the former one and consists of three steps: hologram contrast enhancement, bandpass filtering and V-filtering, and reconstructed image smoothing. The hologram contrast enhancement pretreatment, which can be achieved by highpass filtering, is adopted to improve the diffraction efficiency of the recorded digital hologram and suppress zero diffraction component of the reconstructed image. Using bandpass filtering and V-filtering to the reconstructed image with background noise, the noise can be eliminated and the viewfield is made homogeneous. Furthermore, smooth processing such as wavelet filtering and median filtering can also enhance the signal-noise ratio of the reconstructed image. It is shown that the method need record hologram only once and these three simple processing steps are effective for improving the reconstructed image quality and obtaining the satisfying results. It is especially applicable for the numerical reconstruction of lensless Fourier transform hologram, and more practical.

Key words: digital holography; lensless Fourier transform hologram; contrast enhancement; bandpass filtering; V-filtering

1 引　　言

与菲涅耳全息、像全息等离轴全息术相比，无透镜数字傅里叶变换全息术[1,2]具有如下优点：1）记录光路简单，光学元件少，可避免因透镜带来的像差等非线性因素的影响；2）数值再现物场算法简单，只需作一次傅里叶变换，缩短了再现周期，可实现准实时化；3）由于采用球面参考光波，从而能够获得高的横向分辨率，且能够充分利用 CCD 的全部空间带宽。但是，由于数字再现时物光波自相关项（0 级衍射项）的存在，使得±1 级衍射项与 0 级衍射斑相

* 航空科学基金（02153075）资助课题。

** 通信联系人。E-mail: jlzhao@mwpu.edu.cn

收稿日期：2003-07-18；收到修改稿日期：2003-12-30

互干扰，影响了再现像的质量。同时，在实际操作中，系统所获取的原始图像是不完美的，如由于光照的不均匀、系统噪声污染等原因，图像质量不可避免地被降低。故需要针对再现像的特点进行相应的图像处理。

对于菲涅耳全息、像全息等离轴数字全息图的再现，迄今已提出了多种削弱或消除0级衍射和孪生像的方法，包括：提高全息图衍射效率的灰度线性变换法[3,4]，用实际全息图强度减去其平均强度的平均值相减法[5]，用实际全息图强度分别减去参考光和物光波强度的数字相减法（HRO相减法）[6]，在全息图的频域内通过带通滤波提取出有用的频谱成分，并根据实际需要对所提取的频谱成分施加某些调制的频谱滤波法[7]等。无透镜傅里叶变换全息图记录的是物光波的空间频谱，而不是物光波本身，这是与其它离轴全息图最大的不同之处。对此，上述某些削弱或消除全息图0级衍射和孪生像的方法如频谱滤波法不再适用，平均值相减法也没有明显的效果。数字相减法的效果虽然可行，但需要分别采集存储全息图、物光和参考光三幅强度图像，且采集此三幅图像期间，物光和参考光强度不能发生变化，这在对变化物场的测量中是很难实现的。灰度线性变换法对于任何数字全息图都适用，但不能削弱全息图的0级衍射。针对无透镜傅里叶变换全息图数值再现的特点，以及影响其再现像质量的最大因素即全息图的0级衍射，本文提出一套数字图像处理算法，包括全息图衬比度增强预处理、带通和V型滤波以及再现像平滑等。该套算法只需要记录一幅数字全息图，通过简单的数字图像处理，便可消除0级衍射斑对再现像的影响。

2 全息图的预处理

用CCD等图像传感器接收无透镜傅里叶变换全息图，并将其以数字图像格式存储于计算机中，这样在数值再现之前，可以先对所采集的数字全息图进行衬比度增强预处理。实验中采用高通滤波来实现数字全息图的衬比度增强，从而提高全息图的衍射效率，消除0级衍射斑对再现像的影响。

无透镜傅里叶变换全息图记录的是物体光波的空间频谱，即物场的傅里叶变换。因此对无透镜傅里叶变换全息图只需作一次傅里叶变换（或逆傅里叶变换）就可以实现物场数值的再现。在数值再现中，影响再现像质量的最大因素是物光波的自相关项及直接透过全息图的光波（0级衍射项）对±1级衍射项的干扰。0级衍射项可看成是全息图的低频成分，±1级衍射项则看成是全息图的高频成分。如果在对数字全息图作数值再现之前，先对其进行高通滤波处理以滤除其低频成分，那么经过一次傅里叶变换后，就可以消除再现像中的0级衍射斑。

高通滤波处理是一种线性滤波技术[8]。从原理看，频域滤波是给频谱函数乘上一个滤波（传递）函数 $H(u,v)$，相当于在空间域把图像与滤波函数的空间域函数 $h(x,y)$ 做卷积，其中 $h(x,y)$ 是 $H(u,v)$ 的傅里叶逆变换。设图像 $f(x,y)$ 大小为 $M\times N$ 像素，则 $h(x,y)$ 的大小也为 $M\times N$。当 M、N 的值很大时，直接做卷积运算很费时间。因此常用小区卷积，即把图像分成许多小区进行滤波，这个小区称为滤波窗口，是空间域的一个小图像块，也称为样板或掩模，大小一般取为3×3、5×5等，常用程序中往往选择3×3的滤波窗口做卷积。选择不同的滤波窗口就可以实现图像的高通、低通、带通、带阻等滤波操作。实验中经比较选择如下的空间域高通滤波函数能够较好地滤除全息图的低频成分：

$$h=\begin{bmatrix}-1 & -1 & -1\\ -1 & 9 & -1\\ -1 & -1 & -1\end{bmatrix}. \tag{4}$$

图1给出了高通滤波处理前后的实验结果。其中图1(a)为高通滤波处理前（仅作灰度线性变换处理）的全息图，图1(b)为高通滤波处理后的全息图。图1(c)和图1(d)分别为图1(a)和图1(b)的数值再

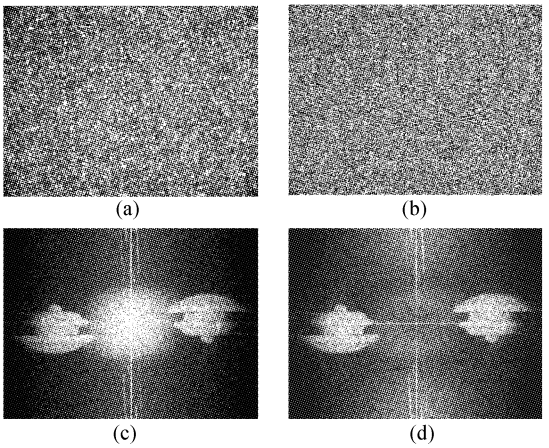


Fig. 1 Numerical reconstructed image without and with highpass filtering. (a) Hologram without highpass filtering, (b) Hologram with highpass filtering, (c) Reconstructed image without highpass filtering, (d) Reconstructed image with highpass filtering

现像。可以看出，经高通滤波处理后全息图中的低频散斑噪声大大减小，同时相对加强了物光波和参考光波的微细干涉条纹这一高频信息。同时，经过高通滤波处理后再现像中的 0 级衍射斑被大大削弱了，图像衬比度得到改善。与以往文献中提出的数字相减法、灰度线性变换法相比，高通滤波法不存在要求物场必须为静态的局限性，故对静态和动态物场都能适用，不仅具有灰度线性变换法可提高全息图衍射效率的优势，而且能够很好地削弱 0 级衍射斑所造成的影响，还可以实现实时化操作。

3　再现图像的带通及 V 型滤波

对数字全息图进行以上预处理能明显减小 0 级衍射斑对再现像的影响，但再现像仍或多或少存在着因 0 级衍射斑而带来的背景噪声。为了突出再现像，最大程度地滤除噪声，可对再现图像进一步作带通滤波和 V 型滤波处理。所谓带通滤波，就是用带型 0 矩阵把再现图像中 0 级衍射斑处的强度赋值为 0，“带子”的宽度取决于再现图像中原始像和共轭像与 0 级衍射斑的分离程度，即为原始像和共轭像之间相隔的距离，这可直接从再现图像看出。经过处理后的再现图像已基本上滤除了背景噪声。不过可以发现，由于 0 级衍射斑的影响，靠近 0 级衍射斑的部分再现像亮于再现像的外侧部分，即图像的亮度显得不均匀。所谓 V 型滤波，就是对再现图像乘上一个“V”型矩阵。该矩阵与再现图像具有相同的维数，其特点是矩阵的每一列（行）数据相同，每一行（列）的数据则呈左右（或上下）对称分布（根据再现出的全息像的具体位置而定），两端数据值为 1，中间数据值为 0，之间按非线性衰减（或增长）变化，形式为 x^y，其中 y 可调。

图 2 所示为带通滤波处理结果。其中图 2(a) 为所用的带通滤波器，图 2(b) 为经过带通滤波后的再现图像。与图 1(c)、图 1(d) 相比可以看出，再现图像的背景噪声得到了很好地抑制。

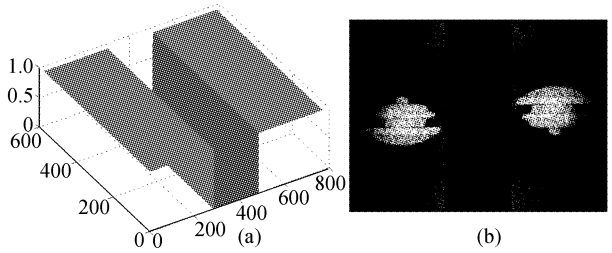


Fig. 2　Reconstructed image with bandpass filtering. (a) Bandpass filter, (b) Reconstructed image with bandpass filtering

图 3 所示为 V 型滤波处理结果。其中图 3(a) 为所采用的 V 型滤波器，根据再现图像中间亮两边暗的特点，经过比较，取 $y=1.4$；图 3(b) 为经 V 型滤波处理后的再现图像，可以看出再现图像的亮度变得均匀。经过以上两种处理，降低了再现图像的背景噪声，并使再现视场变得均匀，提高了图像的信噪比，明显改善了再现像质。

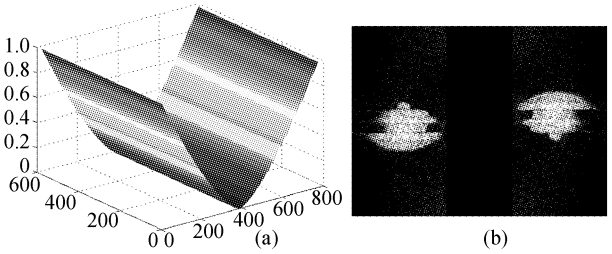


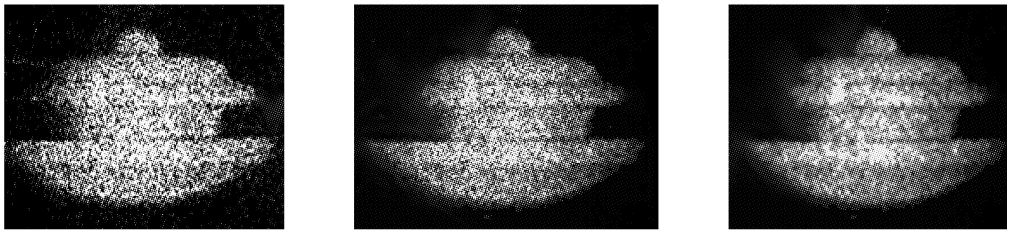
Fig. 3　Reconstructed image with V-filtering. (a) V-filter, (b) Reconstructed image with bandpass filtering and V-filtering

4　再现像的平滑处理

平滑处理的目的主要是为了消除再现像的随机散斑噪声。当相干光照射光学粗糙的物体表面时[9]，从物体上每一点反射的光波都具有一个随机相位，所有光波的叠加就会生成颗粒状散斑图样。散斑的大小和衬比度与实验光路的几何结构、物体表面粗糙度以及照明光波波长有密切关系。数字全息术中，随机散斑噪声严重影响了再现像的质量。实验表明采用小波滤噪和均值滤波等平滑处理方法可从某种程度上提高再现像的信噪比。

二维小波变换是一种窗口大小固定不变但其形状可改变的空频局部化分析方法[8]。通过小波变换，在图像的高频部分可以取得较好的空间分辨率，在低频部分可以取得较好的频率分辨率，从而能有效地从带有噪声的信号中提取信息。利用二维小波分析去噪的步骤是：1）二维图像信号的小波分解。选择一种小波函数及其分解的层次 N，计算信号 S 到第 N 层的分解。2）对高频系数进行阈值量化。于 1 到 N 的每一层，选择一个阈值，并对该层的高频系数进行软阈值量化处理。3）二维小波的重构。根据分解的第 N 层的低频系数和经过修改的从第 1 层到第 N 层的各层高频系数计算二维信号的小波重构。实验中采用 sym5 小波函数进行 2 层分解，利用 Matlab 语言中的 ddencmp 函数计算去噪的默认阈值，并用全局阈值选项进行图像的消噪。中值滤波是基于排序统计理论的一种能有效抑制噪声的

非线性信号处理技术[5]，其优点是运算简单且速度较快，在滤除噪声(尤其是脉冲噪声)的同时能很好地保留信号的细节信息(如边缘、锐角等)。进行中值滤波时，设置一个滤波窗口，将其移遍图像(序列)上的各点，并且用窗口内各原始值的中值代替窗口中心点的值。实验中采用的滤波窗口为[3,3]。两种平滑处理结果如图4所示。其中，图4(a)是图3(b)的一个放大像，图4(b)为小波滤噪后的再现像，图4(c)为进一步作中值滤波后的再现像。可以看出，经过小波滤噪后散斑变小，图像显得更加细腻。进而再作中值滤波后，图像表面显得更加光滑。



(a) (b) (c)

Fig. 4 Reconstructed image with wavelet filtering and median filtering. (a) A magnified image of Fig. 3(b), (b) reconstructed image with wavelet filtering, (c) reconstructed image with wavelet and median filtering

对于给定散射物体，在其他条件不变的情况下，其再现像的散斑也是恒定的。要想消除或减小散斑的影响，可以采用多幅再现像叠加方法。具体做法是，旋转放在激光器出光口处的半波片，改变相干光的偏振方向，从而改变全息图的散斑场分布；记录这些全息图，并对其再现像进行叠加，这样就可以平滑随机散斑噪声。如果将 N 幅具有不同散斑场分布的全息图的再现像叠加平均，图像的信噪比将提高 $N^{1/2}$ 倍[10]。当然，这种方法只适用于在多幅全息图记录期间相对静止的物场，对于瞬变的物场不适用。

结论 不同于以往的削弱或消除全息图0级衍射和孪生像的方法，本文针对无透镜傅里叶变换全息图数值再现的特点提出了一套图像处理算法，包括全息图预处理、再现图像的带通和V型滤波及再现像的平滑处理等三部分。该方法只需要记录一幅数字全息图。能够很好地消除再现图像的0级衍射斑，增强其衬比度，并能有效提高再现像的信噪比。此外[11]，该方法不需要额外的装置和附加的操作手段，所有处理均由计算机完成，算法简单，能够充分利用无透镜数字傅里叶变换全息图的优点，实现物场的高清晰度重建和快速自动测量，相信在微结构的形貌及形变测量方面将具有很强的优势。

参 考 文 献

1 Wagner C, Seebacher S, Osten W *et al.*. Digital recording and numerical reconstruction of lensless Fourier holograms in optical metrology. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(22): 4812～4820

2 Dirksen D, Droste H, Kemper B *et al.*. Lensless Fourier holography for digital holographic interferometry on biological samples. *Opt. Las. Engng.*, 2001, **36**: 241～249

3 Wang Xiaodan, Wu Chongming. *System Analysis and Design Based on MATLAB——Image Processing* (基于 *MATLAB* 的系统分析与设计 —— 图像处理). Xi′an: Xidian University Press, 2000. 7～8 (in Chinese)

4 Huo Bixue, Chen Guofu. Image processing in imaging technique through scattering media using fs electronic holography. *Science In China* (Series A) (中国科学 A 辑), 1999, **29**(8): 750～756 (in Chinese)

5 Kreis T M, Jüptner W P O. Suppression of the dc term in digital holography. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(8): 2357～2360

6 Takaki Y, Kawai H, Ohzu H. Hybrid holographic microscopy free of conjugate and zero-order images. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(23): 4990～4996

7 Cuche E, Marquet P, Depeursinge C. Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(23): 4070～4075

8 Zhang Zhaoli, Zhao Chunhui, Mei Xiaodan. *Modern Image Processing Technique and Matlab Realization* (现代图像处理技术及 *Matlab* 实现). Beijing: Posts & Telecom Press, 2001. 142～144, 171, 277～281 (in Chinese)

9 Pedrini G, Tiziani J, Zou Y. Speckle size of digitally reconstructed wavefronts of diffusely scattering objects. *J. Mod. Opt.*, 1996, **43**(2): 395～407

10 Hou Bixue, Chen Guofu, Feng Shan *et al.*. Electronic holography using ultrashort laser-pulse for imaging through highly scattering media. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(3): 315～320 (in Chinese)

11 Liu Cheng, Li Lianyu, Li Yinzhu *et al.*. Digital holography free of zero order differaction and conjugate images. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(4): 427～431 (in Chinese)