

文章编号: 1001-3806(2007)04-0354-04

## 基于多次滤波技术的单次曝光三维物体数字全息

王 亮, 冯少彤, 聂守平\*, 黄 飞

(南京师范大学 江苏省光电技术重点实验室, 南京 210097)

**摘要:** 为了改善数字全息重构像质量以达到可实际利用的目的, 首先采用以马赫-曾德尔干涉仪为基础的三维物体全息实验光路, 运用单次曝光的方法, 记录了真实三维物体的数字全息图。由于对该全息图直接计算得到的重构像, 受零级衍射光斑和散斑噪声的影响较大, 使得重构像质量难以令人满意。为此采用了一套独特的多重滤波数字图像处理方法, 即综合运用小波分析与收缩加权平均滤波对实验获得的数字全息图及其数字重构像进行滤波处理, 成功地消除了数字重构像中的零级衍射光斑, 减小了散斑噪声的影响, 得到逼真的三维物体重构像。实验结果表明, 该方法简便、实用, 可显著提高三维物体重构像的质量。由于采用单次曝光, 无需记录多幅图像, 此方法便于在实时图像分析处理等领域中应用。

**关键词:** 全息; 数字全息术; 图像处理; 小波分析; 收缩加权平均滤波; 散斑

中图分类号: O438.1 文献标识码: A

### Single exposure 3-D object digital holography based on multi-filtering technique

WANG Liang, FENG Shao-tong, NIE Shouping, HUANG Fei

(Optoelectronic Technology Key Laboratory, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

**Abstract** For improving the quality of the reconstructed image calculated from the hologram, a 3-D object digital hologram was successfully recorded by using single exposure method and 3-D object holographic optical setup based on Mach-Zehnder interferometer. The quality of the reconstructed image directly calculated from the recorded hologram was unsatisfactory because of the presence of the zero-order diffraction and the speckle noise. A set of digital image processing algorithms was then proposed to process the digital hologram and the reconstructed image with multi-filtering technique. The method synthesizing the wavelet filtering and the contracted weighted mean filtering is capable to eliminate the zero-order diffraction component and reduce the speckle noise to obtain realistic reconstructed image. The experimental result shows that this simple method is very effective for improving the quality of the reconstructed image. For recording hologram only once, it is convenient for application in the real time image processing fields.

**Key words** holography; digital holography; image processing; wavelet filtering; contracted weighted mean filtering; speckle noise

### 引 言

数字全息是一种利用高分辨率 CCD 进行数字记录并通过计算机的快速运算进行数字再现的全息术。数字全息通过 CCD 以数字形式直接记录物场全息图, 不需要湿处理, 通过计算直接获得被记录物体重构像的复振幅分布。由于全息图中包含物体衍射光的振幅和相位全部信息使得到的三维物体重构像有很强立体感。数字全息整个过程快速、灵活, 便于进行定量分

析、测量及实时处理, 随着计算机和 CCD 的发展, 已越来越广泛地应用于多种领域, 如三维形貌测量<sup>[1]</sup>、振动测量<sup>[2]</sup>、全息显微术<sup>[3]</sup>等。但由于重构像中零级衍射项的存在, 占有了大部分光能量, 使真实像暗淡不清, 重构像的质量受到很大影响。同时在三维物体数字全息中, 光波叠加产生的散斑噪声又会对重构像产生较大影响。这些问题都极大地阻碍了数字全息的实际应用。

对于数字全息中重构像质量的提高, 迄今已提出了多种方法。基于相移技术的数字全息<sup>[4,5]</sup>通过记录多幅参考光有相位变化的全息图可很好地消除零级像。但该方法需要多次曝光记录两幅以上全息图, 并且对全息记录时的环境条件要求较高, 既增加了全息记录的难度, 又无法用于实时再现。频域滤波的办法虽然只需记录单幅全息图就可以将其中的零级谱去

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2006726); 江苏省教育厅自然科学基金资助项目 (05KJB140065)

作者简介: 王 亮 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事图像处理及光信息技术领域的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: nieshouping@njnu.edu.cn

收稿日期: 2006-06-09; 收到修改稿日期: 2006-07-27

掉<sup>[6]</sup>,但该方法滤波器设计比较困难,难以对不同情况下记录的全息图频谱都准确消除零频,这样很容易使物像信息也受到损失。

作者提出一套简便、实用的数字图像处理方法,即综合运用小波分析和空间平均滤波技术,对三维物体数字全息光路记录得到的数字全息图及其重构像进行顺次滤波处理。实验结果表明,该方法可成功地消除零级衍射光、保留物像信息,使物体重构像的对比度、亮度有了很大的提高,有效抑制散斑噪声对重构像的影响,并且只需进行单次曝光,记录一幅数字全息图,无需多次曝光以记录多幅图像,便于推广到其它的实时应用领域。

## 1 数字全息的基本原理及其实现

数字全息实现的整个过程可简单划分成两个过程。第一是干涉记录过程,三维物体衍射光波与参考光发生干涉由 CCD 记录下来,此过程为实际光学过程;第二是衍射重构过程,再现光从全息记录面传播到像平面形成重构像,此过程为通过计算机计算实现的过程。第 1 个过程中,物光的传播符合菲涅耳衍射条件,叠加平面参考光  $R$  后,物光和参考光产生干涉,CCD 记录下干涉光强即为数字全息图。全息图干涉光强的分布为:

$$I(x, y) = |O + R|^2 = R^2 + O^2 + R^* O + O^* R \quad (1)$$

式中,  $O$  为物光场分布。全息图的再现即第 2 个过程是光波经全息图后衍射产生的,再现光场可描述为<sup>[7]</sup>:

$$U(x_i, y_i) = \frac{\exp(jkZ_i)}{j\lambda Z_i} \exp\left[j\frac{k}{2Z_i}(x_i^2 + y_i^2)\right] \times \iint I(x, y) \exp\left[j\frac{k}{2Z_i}(x^2 + y^2)\right] \times \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda Z_i}(xx_i + yy_i)\right] dx dy \quad (2)$$

式中,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $Z_i$  为像平面到 CCD 记录面的距离。由于这一过程在数字全息中是利用计算机计算实现的,所以必须采用其离散形式才能进行数字计算。

(2) 式的离散形式为:

$$U(m \Delta x_i, n \Delta y_i) = \frac{\exp(j2\pi Z_i/\lambda)}{j\lambda Z_i} \times \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda Z_i}(m^2 \Delta x_i^2 + n^2 \Delta y_i^2)\right] \text{FFT}\{I(k, l)\} \times \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda Z_i}(k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)\right] \quad (3)$$

从 (2) 式到 (3) 式,假设了 CCD 靶面有  $N_x \times N_y$  个像素,每个像素大小为  $\Delta x \times \Delta y$ ,  $k$  和  $l$  为整数,  $-N_x/2 \leq k \leq N_x/2$ ,  $-N_y/2 \leq l \leq N_y/2$ ,  $m$  和  $n$  同样为整数,取值范围一般也为  $-N_x/2 \leq m \leq N_x/2$ ,  $-N_y/2 \leq n \leq N_y/2$

$\Delta x_i$  和  $\Delta y_i$  是像平面的采样间隔,其值分别为  $\Delta x_i = \lambda Z_i/N_x$ ,  $\Delta y_i = \lambda Z_i/N_y$ 。

采用的数字全息实验光路如图 1 所示<sup>[8,9]</sup>, CCD

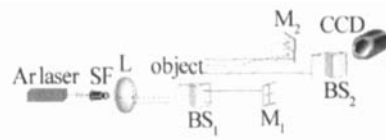


Fig 1 Optical recording setup for digital holograms SF—spatial filter, L—lens, BS—beam splitter, M—mirror

靶面像素数为  $1024 \times 1024$ , 像素大小为  $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ , 选用的三维物体为  $28\text{mm} \times 28\text{mm} \times 21\text{mm}$  的鸳鸯挂件装饰品,物体到 CCD 的距离为  $580\text{mm}$ 。

图 2 是图 1 所示光路中 CCD 直接记录所得的数字全息图,运用 (3) 式对记录所得的数字全息图直接

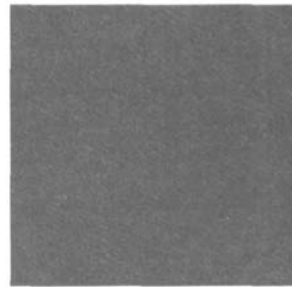


Fig 2 The digital hologram

计算得到的重构像,如图 3 所示。图中零级衍射光斑亮度极高,严重影响重构像的视觉效果,使重构像显得



Fig 3 The direct reconstructed image

暗淡不清,且重构像受到散斑噪声的干扰较大。下面利用小波分析和空间平均滤波方法提高重构像的成像质量、改善视觉效果。

## 2 利用多次滤波技术优化实验结果

### 2.1 利用小波分析滤波法消除零级衍射光斑

在数字全息重构中,零级衍射光斑由 (1) 式的前两项所形成,是与直流成分相对应的,属于低频成分,而重构像中的物像属于高频成分,利用这一特性可以用小波分析的方法对实验得到的数字全息原图进行小波分解和有选择性地小波重构来达到消除零级衍射光斑的目的。

小波变换简单来说就是把输入信号分解到两个函

数空间,一个是多尺度函数空间,另一个是小波函数空间,用滤波器的观点来看,就是把信号通过低频和高频滤波器分解为近似系数和细节系数两个部分。若信号  $f(t)$  的离散采样数据为  $f_k = c_{0k}$ , 则信号  $f(t)$  的小波变换分解为<sup>[10 11]</sup>:

$$c_{j,k} = \sum_n c_{j-1,n} h_{k-2n}, d_{j,k} = \sum_n c_{j-1,n} g_{k-2n},$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (4)$$

式中,  $c_{j,k}$  为近似分量,  $d_{j,k}$  为细节分量,  $h, g$  为对应所选用小波基函数而形成的一对滤波器组,  $h$  为低通滤波器,  $g$  为高通滤波器,  $j$  为分解层数,  $N$  为离散采样点数。相应的重构表达式为:

$$c_{j-1,k} = \sum_n c_{j,n} h_{k-2n} + \sum_n d_{j,n} g_{k-2n} \quad (5)$$

小波分析运用到二维图像处理领域每一层次分解都会得到 4 组系数,对应可得到 4 幅子带图像,它们分别表示低频近似信息和水平、垂直、对角方向上的高频细节信息。随着分解层数的增加,分解所得低频部分中包含的细节信息越来越少,可根据实际需要选择分解层数以恰当分离近似和细节信息。

在一般信号处理中,低频部分是表征信号本身特征的,而高频部分则是表征信号的细微差别,如果滤除其中的低频部分只剩信号的细节,信号将无法辨别。而在数字全息中,对应低频的零级衍射光斑反而是最主要的噪声,物像信号的主要信息都集中在高频部分,保留数字全息图的高频部分即可完整再现物像。可以利用小波分析分层次分离图像高频和低频信息的特点,在重构中仅用细节系数重构而去除最高尺度分解后得到的近似系数,无需输入任何其它附加信息,即可达到良好的滤除零级衍射光斑而保留几乎全部物像信息的目的。

实验中选用 SYMLETS 小波系中的  $\text{sym4}$  小波函数对图 2 进行 3 层小波分解,可得到如图 4 的示意图,

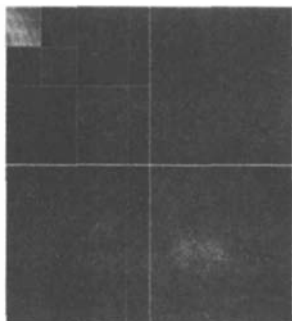


Fig 4 The decomposition result for Fig 2

左上角的子带图代表了 3 层小波分解后得到的近似信息,重构中去除该子带图所对应的近似系数保留其它系数,可得到处理过后的数字全息图。利用该图可再次用 (3) 式进行计算,计算后得到的重构像见图 5。由

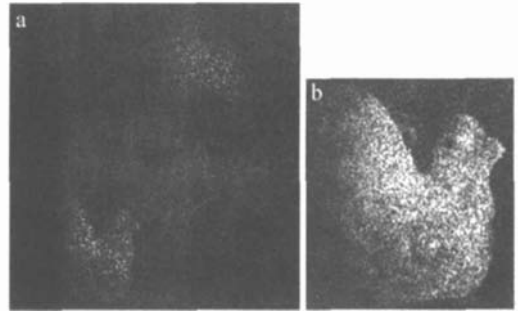


Fig 5 The reconstructed image without the zero-order diffraction a—the whole shrunken image b—the mandarin duck (partly)

图中可看出,零级衍射光斑被完全去除,而物像与图 3 相比细节没有明显变化,物像信息被完全保留。同时由于高亮度零级衍射光斑干扰的去除,物像的亮度有所增加,物像显示效果得到了一定程度的提高。

## 2.2 利用收缩加权平均滤波法提高物像显示质量

图 5 中的物像虽然已不再受零级衍射光干扰,但显示质量较差,亮度和对比度都仍显不足。如何提高物像的亮度和对比度又使物像的边缘、轮廓不受损失,保持物像的立体感这一全息再现的独特优势,这也是一个急待解决的问题。

一般的邻域均值滤波法,是设计一个均值滤波模板在对模板归一化后与图像作卷积,用一个像素邻域内各像素灰度的平均值来代替该像素原来的灰度,图像亮度和对比度会有所增加同时对噪声也有一定的抑制作用,但同时图像中目标区域的边界也会变得模糊,应用于数字全息会使物像立体感大大降低,削弱全息术的优势。图 6 为应用一般邻域均值法处理图 5 后的

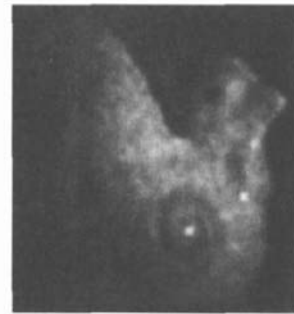


Fig 6 The reconstructed mandarin duck processed by common mean filter 结果,物像边界较为模糊,立体感不强。

$$I'(m, n) = \frac{1}{s^2 + 1} \left\{ \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s I[s \times (m-1) + i, s \times (n-1) + j] + I[s \times (m-1) + \text{int}(s/2) + 1, s \times (n-1) + \text{int}(s/2) + 1] \right\},$$

$$(m = 1, 2, \dots, \text{int}\left(\frac{N_x}{s}\right); n = 1, 2, \dots, \text{int}\left(\frac{N_y}{s}\right)) \quad (6)$$

采用收缩加权平均滤波法,处理过程不用模板卷积,而是事先设定一个  $s$  值(奇数),对小波分析后的数字全息图进行横向和纵向步长为  $s$  像素的扫描,把每  $s \times s$

个像素的灰度值加权相加求平均, 再在另一幅大小为  $\text{int}(N_x/s) \times \text{int}(N_y/s)$  的新图中表示对应像素的灰度值 ( $N_x \times N_y$  为原图的大小)。实验中采用 (6) 式的收缩加权平均滤波公式对图 5 进行处理 ( $s=5$ ),  $I$  为原图对应像素灰度值,  $I'$  为新图对应像素灰度值, 计算后得到图 7。可见物像亮度和对比度都有很大程度的提



Fig 7 The reconstructed mandarin duck processed by contracted weighted mean filter

高, 并且最大限度地保留了物像的细节信息, 物像边界轮廓清晰、表面质感细腻, 同时对散斑噪声也有一定的抑制作用, 大幅提升了物像的显示质量。

### 2.3 利用小波分析滤波法进一步减小散斑影响

小波分析的多分辨率分析特点, 使它能够在任意细节进行多分辨率的时频域分析。通过对噪声的奇异性分析, 得出白噪声的小波变换的极大值随尺度减小而增大, 而这正与信号的小波变换值随尺度增大而增大所相反。因此, 通过处理小波变换的细节系数可以实现抑制噪声的目的。去除细节系数中由噪声产生的系数, 同时保留有效信号产生的系数, 再进行重构, 可获得原信号的最佳估计。

利用二维小波分析减小散斑影响的步骤是先对经平均滤波法处理后的重构像进行二维小波分解<sup>[12]</sup>, 然后对所得系数进行阈值量化处理, 剔除不符合阈值要求的系数, 最后再利用处理后的系数进行二维小波重构。实验中为获得较理想图像质量, 对图 7 进行 2 层小波分解, 所得系数经阈值量化处理后重构得到图 8。

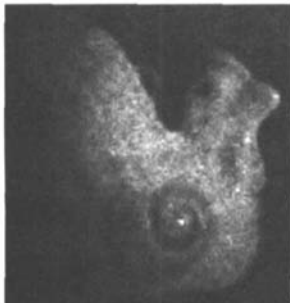


Fig 8 The reconstructed mandarin duck with less speckles processed by wavelet analysis

图 8 与图 5 相比较可见, 在原有物像显示质量基础上, 物像表面更加光滑, 散斑噪声大为减小、立体感增强, 且物像边界信息未受明显损失, 达到图像处理预期目的。

## 3 结 论

提出一套完整的数字图像处理方法, 针对数字全息术的特点, 综合运用小波分析与收缩加权平均滤波的方法, 得到清晰逼真的数字重构像。在实验上采用单次曝光的方法, 在实验光路不变的情况下, 仅用计算机对所采单幅数字全息图及其重构像进行处理, 能很好地消除重构像中的零级衍射光斑和散斑噪声, 因而重构的三维物体像具有高亮度、高对比度和很强的立体感, 充分发挥了数字全息的优势, 而且算法简单快捷, 有很强的通用性和实用性。

### 参 考 文 献

- [1] YAMAGUCHI OHTA S KATO J Surface contouring by phase-shifting digital holography [J]. *Optics and Lasers in Engineering* 2001, 36 (5): 417~428
- [2] FROMING P. PEDRINIG, TZIANIH J *et al* Vibration mode separation of transient phenomena using multipulse digital holography [J]. *Opt Engng* 1999, 38(12): 2062~2068.
- [3] YAMAGUCHI I KATO J OHTA S *et al* Image formation in phase-shifting digital holography and application to microscopy [J]. *Appl Opt* 2001, 40(34): 6177~6186.
- [4] TAKAKI Y, KAWA IH, OHZU H. Hybrid holographic microscopy free of conjugate and zero-order images [J]. *Appl Opt* 1999, 38(23): 4990~4996.
- [5] WANG Y Z, ZHEN Y K, ZHANG H J *et al* Study on digital holography with single phase-shifting operation [J]. *Chinese Optics Letters* 2004, 2(3): 141~144.
- [6] CUCHE E, MARQUET P, DEPEURSINGE C. Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography [J]. *Appl Opt* 2000, 39(23): 4070~4075
- [7] YUAN C J, ZHONG L Y, WANG Y P *et al* The analysis of off-axis digital holographic recording conditions [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(5): 482~484 (in Chinese).
- [8] JAVIDIB, KM D. Three-dimensional object recognition by use of single-exposure off-axis digital holography [J]. *Opt Lett* 2005, 30(3): 236~238.
- [9] JAVIDIB, MOON I, YEOM S *et al* Three-dimensional imaging and recognition of microorganism using single-exposure off-axis (SEOL) digital holography [J]. *Optical Express* 2005, 13(12): 4492~4506.
- [10] VEGTE J. *Fundamentals of digital signal processing* [M]. Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2003, 534~568 (in Chinese).
- [11] CASTLEMAN K R. *Digital image processing* [M]. Beijing Publishing House of Electronics Industry, 1998, 290~296 (in Chinese).
- [12] JIANG L H, ZHAO CH H, WANG Q. Algorithm about suppressing speckle noise in coherent laser radar imagery [J]. *Acta Optica Sinica* 2003, 23(5): 541~546 (in Chinese).