

Improvement of Reconstructed Image of Digital Hologram by Using Optimizing Recording Conditions and Reducing Reconstruction Noises*

Yiwen Wei, Yuhan Luo, Zhong Wang, Ping Sun

Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing Area Major Laboratory of Applied Optics, Beijing
Email: pingsun@bnu.edu.cn

Received: Nov. 28th, 2011; revised: Dec. 23rd, 2011; accepted: Dec. 26th, 2011

Abstract: Investigations on improving the quality of reconstructed image of digital holography are carried out. Two processes of recording and numerical reconstruction are taken into account at the same time. Properties of resolution power and contrast of a resolution panel are studied. Some helpful conclusions are obtained. On condition that the aperture size of recording device is larger than an object size, the quality numerical reconstructed image can be improved if the frequency of interference fringe is optimized. In addition, the zero-order and conjugate images are eliminated and the stochastic noises are weakened. The experimental results show that these conclusions are also suitable to general objects.

Keywords: Digital Holography; Spatial Frequency; Aperture Size; Frequency Domain Filtering

记录条件优化与再现像去噪提高数字全息像质*

魏祎雯, 罗玉晗, 王 众, 孙 萍

北京师范大学物理系, 北京市应用光学重点实验室, 北京
Email: pingsun@bnu.edu.cn

收稿日期: 2011年11月28日; 修回日期: 2011年12月23日; 录用日期: 2011年12月26日

摘 要: 从数字全息图的记录和再现两个过程, 针对再现像的对比度和分辨力两个物理量, 对分辨力板的离轴数字全息再现像质的提高进行了实验研究, 得到如下结论, 当记录元件的感光面尺寸大于被记录的物体尺寸时, 如果优化物光与参考光干涉条纹的空间频率, 并采用频域窗口滤波法消除零级光和共轭像, 以及采用空域中值滤波法消除高频随机噪声, 可以明显地提高再现像质量。实验结果还表明, 这一结论也适用于一般物体。

关键词: 数字全息; 空间频率; 感光面; 频域滤波

1. 引言

数字全息术是光学全息技术、计算机技术和电子成像技术相融合的一种新兴的成像技术。数字全息术由 J. W. Goodman 和 R. W. Lawrence^[1]于 1967 年提出, 直到二十世纪九十年代中期, 随着电子图像传感器性能与分辨力的提高和计算机技术的飞速进步才得

*基金项目: 北京自然科学基金(4102031)项目和北京市大学生科学研究与创业行动计划项目资助。

以迅速发展。目前, 数字全息术已成功地应用于显微成像、粒子场的测试、图像加密、活体生物成像等众多领域^[2,3]。与传统的光学全息术相比, 数字全息术的优点是, 没有繁琐的化学湿处理过程, 可以实时进行图像的获取和处理, 数值重建可以同时获得光场的强度分布和相位信息, 并且数值重建还可以利用精度高、灵活性强的数字图像处理技术。然而, 数字全息术的缺点也比较明显, 再现像的质量仍然较低。影响

像质的主要因素有^[4-10]：记录元件感光面尺寸较小、像元尺寸较大，导致数字全息再现像的分辨率降低；零级衍射在再现像中心所形成的亮斑，导致再现像对比度下降；共轭像的干扰影响再现像的信噪比；高频散斑噪声影响再现像的清晰度。本文对全息图的记录条件进行优化，并对再现像进行去噪处理，旨在对记录与再现两个过程同时进行优化，获得高清晰度、高对比度、高分辨力的再现像。

2. 原理

2.1. 数字全息术基本原理

全息术通过记录物光波和参考光波干涉光场的强度来达到记录物光波的振幅和相位信息的目的。若分别以 $O(x, y)$ 和 $R(x, y)$ 表示物光波和参考光波的复振幅，则传统的光学全息记录平面上的干涉强度分布为^[2]

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

式中符号*表示复共轭。

假设全息图的记录元件是 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)，设 CMOS 感光面积为 $L_x \times L_y$ ，包含 $N_x \times N_y$ 个像元，且像元大小为 $\Delta x \times \Delta y$ ，则有 $\Delta x = L_x/N_x$ ， $\Delta y = L_y/N_y$ 。当用 CMOS 记录菲涅耳全息图时，数字全息图的强度分布为^[9,11]

$$I_H(k, l) = I_H(x, y) \text{rect}(x/L_x, y/L_y) \times \sum_{k=-N_x/2}^{N_x/2} \sum_{l=-N_y/2}^{N_y/2} \delta(x - k\Delta x, y - l\Delta y), \quad (2)$$

式中 k, l 为整数，且 $-N_x/2 \leq k \leq N_x/2$ ， $-N_y/2 \leq l \leq N_y/2$ ， δ 表示二维脉冲函数， $\text{rect}(x/L_x, y/L_y)$ 表示 CMOS 感光面的面积。

在菲涅耳衍射近似条件下，光学全息再现像面上光波的复振幅分布为^[2,9]

$$U(x', y') = A \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda d} (x'^2 + y'^2)\right] \times \iint I_H(x, y) R(x, y) \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right] \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda d} (xx' + yy')\right] dx dy, \quad (3)$$

式中 A 为复常数， λ 为入射光波波长， d 为再现距离，当再现距离等于记录距离时，可得到清晰的再现像。一

般用单位振幅的参考光照明全息图，即取 $R(x, y) = 1$ 。按照傅里叶变换的定义，(3)式的积分是对函数

$$I_H(x, y) \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right] \text{进行傅里叶变换，即} \\ U(x', y') = A \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda d} (x'^2 + y'^2)\right] \times \text{FFT}\left\{I_H(x, y) \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right]\right\}, \quad (4)$$

式中 FFT 表示快速傅里叶变换。当采用数字重建时，计算机所显示的离散全息图的再现像的光强分布为^[2,9]

$$U(m\Delta x', n\Delta y') = A \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda d} (m^2\Delta x'^2 + n^2\Delta y'^2)\right] \times \text{DFFT}\left\{I_H(k, l) \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda d} (k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)\right]\right\}, \quad (5)$$

式中 DFFT 表示快速离散傅里叶变换。 m, n 的取值一般与 k, l 相同，再现像面上的采样间隔 $\Delta x'$ 和 $\Delta y'$ 可表示为 $\Delta x' = \lambda d/N_x \Delta x$ ， $\Delta y' = \lambda d/N_y \Delta y$ 。

2.2. 记录条件

获得高质量再现像的前提条件是记录高质量的数字全息图。由于 CMOS 具有记录信息离散化、像元尺寸大、感光面小的限制，数字全息对记录条件有一定的要求。鉴于分析问题方便，本文在实验中建立的物光与参考光的干涉条纹为垂直于 CMOS 横向的竖直条纹。为了能使物体的信息被 CMOS 完整地记录下来，根据采样定理^[6]，参考光和物光形成干涉条纹的空间频率需满足 $f \leq \frac{1}{2\Delta x}$ ，这就限制了物光与参考光

的最大夹角。对于离轴全息图，若物光与参考光夹角过小，会使再现像与零级光重叠。为了使物体再现像与零级光完全分开，物光与参考光干涉条纹的空间频率需满足 $f \geq \frac{4\theta_{\max}}{\lambda}$ ，其中， θ_{\max} 为物光与 CMOS 法向的最大夹角^[5]。因此，在记录全息图时，要求干涉条纹的空间频率既要满足采样定理，又要保证再现像与零级光分开。

2.3. 再现像去噪

数字全息再现出的图像同时存在零级像、共轭像和真实像，真实像是所要的再现像，而零级像和共轭像的存在将会影响真实像的质量，因此需要对直接再

现像进行去噪处理。

对一般物体的离轴全息的直接再现像进行傅里叶变换,可以获得如图 1 所示的频谱。可见,零级像的频谱位于低频区域,零级像的两侧对称分布的分别是共轭像和真实像,这样就可以在频域中采用滤波窗口将零级像和共轭像滤掉,只保留真实像。图 1 中虚线的右侧表示加窗后滤掉的部分,而左侧则表示保留下来的真实像的频谱。显然,物光频谱再进行重建时就能得到消除了零级光和共轭像的再现像。不过这种窗口滤波法对窗口尺寸的选择要合适,若选择不当会引物体部分有用信息的丢失,从而影响再现像质。

除了受零级光和共轭像的影响之外,全息图的数字再现像还受到其它相干噪声的影响,比如光路中的灰尘或者其它衍射像也会叠加在再现像上。除此之外还有激光散斑噪声,这些高频随机噪声可以通过图像平滑处理来抑制,中值滤波是常用的滤去高频噪声的方法之一,它在保留图像的精细结构的同时消除噪声^[12]。中值滤波方法虽然十分有效,但是窗口的选择要适当。图 2 所示为选取不同滤波窗口时的效果图。可见,如果滤波窗口选择过小(2 pixel × 2 pixel),就不能消除全部噪声,而窗口选择过大(10 pixel × 10 pixel),图像就会变得模糊不清。只有选择大小合适的窗口(5 pixel × 5 pixel)才可以有效去噪。

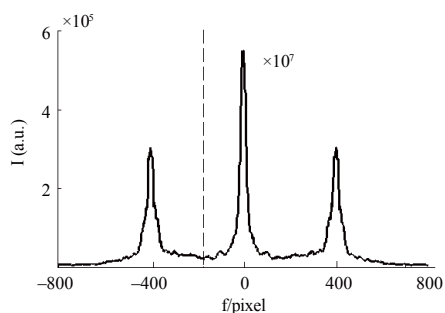


Figure 1. Spatial frequency spectrum of reconstructed image of off-axis hologram

图 1. 离轴全息再现像的空间频谱

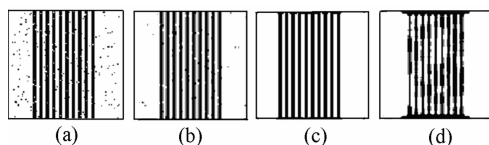


Figure 2. Results of median filtering, (a) original image; (b) 2 pixel × 2 pixel; (c) 5 pixel × 5 pixel; (d) 10 pixel × 10 pixel

图 2. 中值滤波结果, (a) 原始图像; (b) 2 pixel × 2 pixel; (c) 5 pixel × 5 pixel; (d) 10 pixel × 10 pixel

2.4. 再现像的对比度和分辨力

选取对比度和分辨力两个物理量对再现像的质量进行评价。对于两个光强接近的亮条纹,其图像的对比度和分辨力分别定义为

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (6)$$

$$R = \frac{I_{\min}}{I_{\max}}, \quad (7)$$

式中, I_{\max} 和 I_{\min} 分别为光强随位置坐标变化曲线两个相邻波峰与波谷对应的最大值和最小值,如图 3 所示。对比度和分辨力都为小于 1 的数值,对比度数值越大,表明图像对比度越高,而分辨力数值越小,表明图像上的两个物体越可分辨,即分辨力越高。

3. 实验结果及分析

3.1. 记录条件

实验所采用的 CMOS(DH-HV1351UC, 大恒图像视觉技术公司)的像素数为 1280 × 1024, 像元大小为 5.2 μm × 5.2 μm。为了定量分析再现像的对比度和分辨力,被记录的物体采用美军标分辨力板(RT-MIL-TN 2002, 北京杏林睿光科技有限公司)。记录光路如图 4

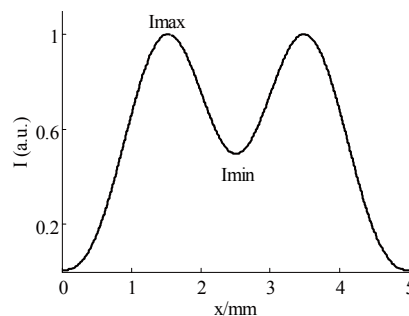


Figure 3. Diagram of fringe intensity
图 3. 条纹强度示意图

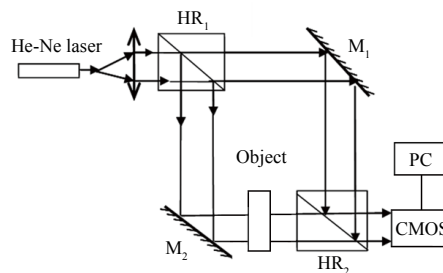


Figure 4. Sketch of experimental setup for recording hologram
图 4. 全息图记录实验装置图

所示,从 He-Ne 激光器发出的光经准直后由半反半透镜 HR₁ 分为两束,一束通过反射镜 M₂ 反射后直接照在物体上作为物光,而另一束通过反射镜 M₁ 反射作为参考光,两束光经过半反半透镜 HR₂ 后在 COMS 上产生干涉,再通过图像采集系统记录数字全息图。

3.1.1. 条纹空间频率的影响

在未放置物体时,物光和参考光会发生干涉,形成等间距的干涉条纹,这时,通过 CMOS 记录的光强分布就可以得到干涉条纹的空间频率。改变干涉条纹的空间频率,记录相应的全息图并进行数值重建得到再现像,选取再现像的对比度和分辨力两个物理量来分析再现像的质量。

图 5(a)为美军标分辨力板原图。测量时,选取分辨力板的第4-1组(图5(b)中标号为1的条纹,16 lp/mm)计算对比度和分辨力,实验结果如图 6 所示。根据采样定理,本实验允许的最大干涉条纹空间频率为 192.3 lp/mm,对应的物光与参考光夹角为 3.49°,由拟合曲线可以看出,在条纹的空间频率为 31 lp/mm 左右时,物光与参考光夹角是 1.12°,一个周期的采样点为 5~6 个,满足采样条件,此时,再现像的对比度最高,分辨力最好,像质最好。当条纹空间频率升高或者降低时,再现像质量都有下降的趋势。

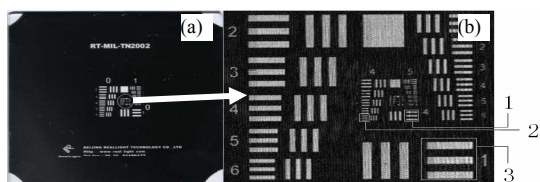


Figure 5. Original resolution panel (a) and amplified image (b)
图 5. 分辨力板的原始图像(a)和局部放大的图像(b)

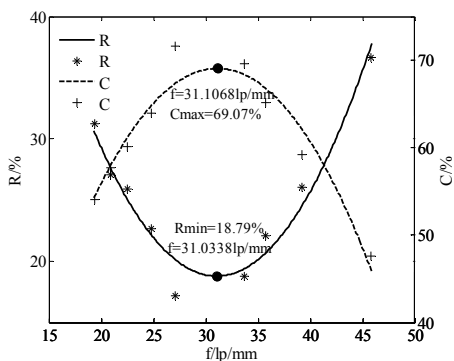


Figure 6. Relationships between resolution or contrast and spatial frequencies
图 6. 分辨力和对比度随空间频率的变化关系

当条纹的空间频率较低时,由于没有充分利用 CMOS 的带宽,并且受到零级光的干扰,再现像的对比度和分辨力都不高。随着空间频率的增加,再现像的对比度和分辨力也增加,不过当条纹的空间频率增加到一定值时,噪声频谱的影响变得明显,使得再现像与噪声的频谱混叠,这时,通过频域滤波的方法已经不能得到较为完整的再现像的频谱,导致再现像质量开始下降。

3.1.2. CMOS 感光面大小的影响

在 31 lp/mm 的最佳条纹空间频率下,保持 CMOS 感光面纵向长度不变,改变横向大小,记录相应的全息图并进行数值重建。实验中选择变化明显的第 4-6 组(图 5 中标号为 2 的条纹,28.5 lp/mm)条纹,图 7 为实验测得的 CMOS 感光面不同尺寸对应的再现像的分辨力和对比度。

实验中所记录物体的横向尺寸为 3.08 mm,当 CMOS 感光面的横向尺寸小于记录物体的尺寸时,感光面对再现像的分辨力及对比度的影响比较大,即感光面尺寸越大对比度和分辨力越高,图像越清晰;当感光面横向尺寸大于记录物体的尺寸时,改变感光面大小,分辨力和对比度基本保持不变。因此,如果所记录的物体比 CMOS 感光面大,则 CMOS 的感光面不足以记录下物光的全部信息,感光面尺寸就会影响全息图的质量。反之,如果记录的物体比 CMOS 感光面小,物光已经全部被 CMOS 感光面记录下来,此时继续扩大感光面只是改变记录参考光信息的多少,对再现像质量没有影响。

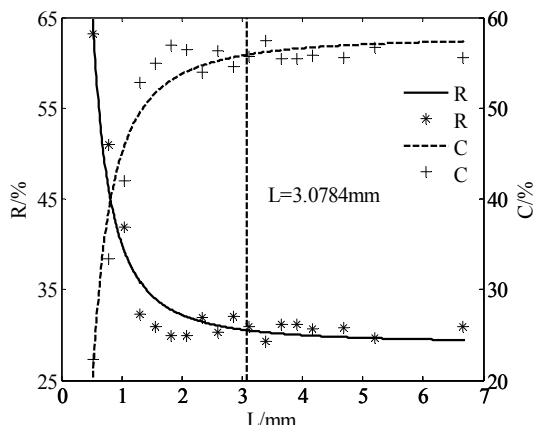


Figure 7. Relationships between resolution or contrast and transverse dimensions of CMOS aperture size
图 7. 分辨力和对比度随 CMOS 感光面横向尺寸的变化关系

3.2. 全息图的数字再现

图 8 为分辨力板在干涉条纹的空间频率为最优值 31 lp/mm 时所获得的全息图的直接再现像, 图 9 为其频谱图。可见, 即使选取了优化的记录条件, 再现像依然受到零级光、共轭像和随机噪声干扰。

本文首先采用频域窗口法消除零级光和共轭像。但是在实际应用这种方法时, 频域滤波的区域选择至关重要。实验中发现, 如果选择的滤波区域过小, 就会丢失很多物体的有用信息, 引起再现像模糊甚至失真。反之, 如果选择的滤波区域过大, 就有可能把其它干扰因素也纳入进来, 使再现像的像质降低。因此, 尽可能多的获得有用的再现像的信息而避免纳入干扰因素是选择滤波区域的准则。本文的具体做法分两步: 第一步, 先对图 9 进行平滑处理后, 在频域中找到零级和真实像频谱中心连线上的强度最低点 P; 第二步, 以真实像频谱中心为中心, 并以该中心到最低点的距离为半宽(图 9 中的 a/2)做正方形滤波窗。这样, 经过滤波后的频谱仅保留了真实像的频谱, 对其进行傅里叶逆变换就可以重建仅有真实像的再现像。

但是, 从图 9 可以明显地观察到真实像的频谱曲线并不光滑, 其上所叠加的噪声便是高频随机噪声的频谱。本文采用空域中值滤波的方法去除这些高频

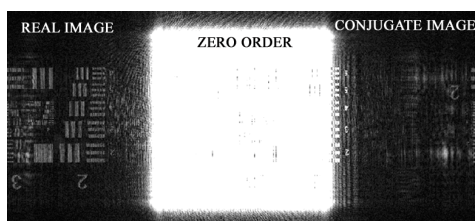


Figure 8. Direct reconstructed image
图 8. 直接再现像

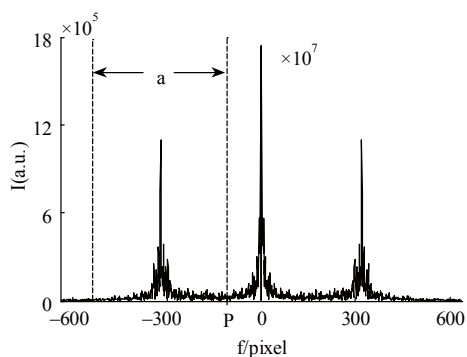


Figure 9. Spatial frequency spectrum of direct reconstructed image
图 9. 直接再现像的频谱

随机噪声。为了清晰地看到中值滤波的效果, 我们采用一维曲线来说明。图 10 是中值滤波前后分辨力板条纹第 2-1 组(图 5 中标号为 3 的条纹, 4 lp/mm)的再现像强度与空间坐标的一维截图。可以看出, 中值滤波后图像被显著平滑。在图像平滑过程中滤波模板越大平滑效果越明显, 但是过大的滤波模板会造成图像细节信息的丢失, 所以中值滤波的方法必须根据具体再现像的清晰度选择适当的滤波窗口。

对于同一幅再现像, 可以根据需要调整滤波窗大小获取不同的信息, 这也是数字全息运用数字处理的优势。若要获得再现像中更多的高频信息, 则宜选择较小的滤波窗, 如研究对象是第 4-6 组条纹(28.5 lp/mm), 则滤波窗选择为 5 pixel × 5 pixel 较合适; 若要获得更多的低频信息, 则宜选择较大滤波窗, 如研究对象是第 2-1 组条纹(4 lp/mm)滤波窗选择 12 pixel × 12 pixel 较合适。

图 11 为经过频域窗口滤波和空域中值滤波后的分辨力板的再现像。实验结果表明, 本文提出的选取频域窗口的方法实用性强, 效果好, 与滤波函数^[10]、相移法^[13]等其它方法相比简单且有效。

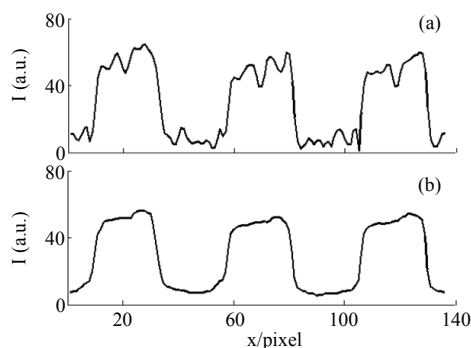


Figure 10. One dimension curve of reconstructed image before (a) and after (b) median filtering
图 10. 中值滤波前 (a)后; (b)条纹再现像的一维曲线

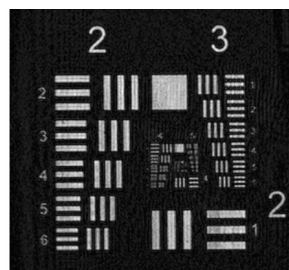


Figure 11. Reconstructed image of resolution panel after window filtering and median filtering
图 11. 经过窗口滤波和中值滤波后的分辨力板的再现像

3.3. 一般物体验证实验

分辨力板本身具有极高的对比度和分辨力，是一种特殊的物体。为了进一步验证前面优化的记录条件，以及再现像去噪的效果，本文还选择了两种一般性的物体进行了实验：一是黑色背景下的透明“师范”二字的胶片，图片尺寸为 $3.2 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ ；二是透明的人像底片，尺寸为 $4.9 \text{ mm} \times 3.7 \text{ mm}$ 。图 12(a)和(c)分别为两种物体先扫描再放大后的图像，由于实物很小，放大后的图像会有些模糊。首先，采用如图 4 所示的实验装置记录全息图，记录时选取干涉条纹的空间频率为 31 lp/mm ，并确定 CMOS 感光面大小为 $5.33 \text{ mm} \times 6.66 \text{ mm}$ 。然后，运用窗口法进行频域滤波消除零级光和共轭像，用 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 的窗口进行中值滤波，最终得到如图 12 所示的再现像。可见，与原图相比，图 12(b)中“师范”二字对比度高，线条分明，图 12(d)中人物五官清晰可辨。实验结果进一步表明，优化记录条件和去除再现像噪声可以提高再现像质量。

4. 结论

从数字全息图的记录和再现两个过程对数字全息再现像质的提高进行了研究，得到如下结论：

1) 当记录元件的感光面尺寸不小于物体尺寸时可以获得高对比度、高分辨力的再现像；



Figure 12. Original films of Chinese words “师范” (a) and a man (c) and their reconstructed images (b) and (d)

图 12. “师范”二字和人物的原始胶片(a)和(c)，以及二者的再现像(b)和(d)

2) 在控制好干涉条纹的对比度和亮度等条件下，优选物光与参考光干涉条纹的空间频率，可以保证获得高质量全息图，为获得高质量再现像提供前提条件；

3) 合理选择频域滤波窗口，可以有效地消除零级光和共轭像的干扰，分离出更多的物像信息，显著提高再现像质量；

4) 适当选取中值滤波窗口的大小可以体现出物体的结构特性。

5. 致谢

感谢北京自然科学基金(4102031)项目和北京市大学生科学研究与创业行动计划项目的资助，同时感谢北京师范大学物理学系周静教授的指导，以及为本文提供照相底片的志愿者。

参考文献 (References)

- [1] J. W. Goodman, R. W. Lawrence. Digital image formation from electronically detected holograms. *Applied Physics Letters*, 1967, 11(3): 77-79.
- [2] U. Schnars, W. P. O. Jüptner. Digital recording and numerical reconstruction of holograms. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13: R85-R101.
- [3] 郑德香, 张岩, 沈京玲等. 数字全息技术的原理和应用[J]. *物理学和高新技术*, 2004, 33(11): 843-847.
- [4] J. P. Liu, T. C. Poon and T. H. Yang. Investigation of zero-order light suppression methods for digital holograms in various ratio factors. *Optical Engineering*, 2011, 50(9): Article ID 091309-1-6.
- [5] D. P. Kelly, B. M. Hennelly, N. Pandey, et al. Resolution limits in practical digital holographic systems. *Optical Engineering*, 2009, 48(9): Article ID 095801-1-13.
- [6] G. L. Chen, C. Y. Lin, M. K. Kuo, et al. Numerical suppression of zero-order image in digital holography. *Optics Express*, 2007, 15(14): 8851-8856.
- [7] S. Adrian, J. Bahram. Analysis of practical sampling and reconstruction from Fresnel fields. *Optical Engineering*, 2004, 43(1): 239-250.
- [8] E. Cucho, P. Marquet and C. Depeursinge. Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography. *Applied Optics*, 2000, 39(23): 4070-4075.
- [9] 钟丽云, 张以馍, 吕晓旭等. 数字全息中的一些基本问题分析[J]. *光学学报*, 2004, 24(4): 465-471.
- [10] 刘诚, 李良钰, 李银柱等. 无直透光和共轭像的数字全息[J]. *光学学报*, 2002, 22(4): 427-431.
- [11] X. Xiao, I. K. Puri. Digital recording and numerical reconstruction of hologram: an optical diagnostic for combustion. *Applied Optics*, 2002, 41(19): 3890-3899.
- [12] J. L. Zhao, H. Z. Jiang and J. Di. Recording and reconstruction of a color holographic image by using digital lensless Fourier transform holography. *Optics Express*, 2008, 16(4): 2514-2519.
- [13] E. Darakis, J. J. Soraghan. Reconstruction domain compression of phase-shifting digital holograms. *Applied Optics*, 2007, 46(3): 351-356.