

数字全息再现像中零级干扰噪声消除及 图像增强研究*

曾 然 赵海发 刘树田

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001)

摘 要 利用基于图像处理的微分梯度方法预先对数字全息图进行空间域的图像增强操作, 可以达到消除全息再现时的零级衍射干扰的目的. 它无需其它辅助设备或多次全息记录, 是一种方便简洁的处理方法. 在理论分析和数字再现结果中都表明, 该方法不仅能够有效地消除零级衍射像, 同时对于真实像的再现质量有着显著提高.

关键词 数字全息; 零级像; 图像处理

中图分类号 TB877 **文献标识码** A

0 引言

数字全息技术是利用 CCD 这种数字光敏元件代替传统技术的照相乳胶干板作为记录媒质, 然后经过数字计算机软件进行数字再现^[1], 是近年来对全息术的重要发展应用. 其优点在于不必对记录媒质进行化学湿处理操作, 同时使实时全息成像的实际应用成为可能. 随着数字计算机的高速发展以及 CCD 器件性能的不断改善, 对数字全息的研究已获得较大进展, 并且因其具有分辨率高灵敏度强等特点, 这一技术已经广泛应用于显微、计量等诸多领域^[2].

在进行数字全息再现时, 尽管利用离轴参考光方法^[3,4]已将几种衍射像在成像平面上分离, 但其中零级像与共轭像^[5]造成干扰, 尤其零级直透光干扰像占有绝大部分的光能量, 使真实像暗淡不清晰, 不宜于观察与测量. 这一问题的解决对于数字计算机参与的混杂型全息系统包括同轴全息技术都有着一定的实际意义. 有一些针对消除零级像干扰的方法已经提出, 其中基于相移技术的数字全息处理中^[6], 需要用到四幅位相相互垂直的参考光记录的全息图, 在对其进行数字相加处理后再再现的结果中可以很好地消除零级像. 另外一种混杂全息处理方法^[7]在应用两个光闸和一台液晶位相调制仪的同时也要记录多幅全息图处理以达到消除干扰的目的. 还有图像相减方法的数字全息技术^[8]在于利用了全息图中散斑的随机性和细微性来处理全息再现的零级干扰问题. 上述方法对于全息记录条件以及各自特定的光学器件都有一定的要求, 增加了全息成像的复杂程度, 另外还需多次采集图像, 很难进行实时再现. 基于拉普拉斯算符图像处理的消除零级方

法^[9], 则只需对原始的数字全息图进行直接的数字处理, 不存在上列方法的复杂化问题. 本文提出另外一种基于数字图像处理的去干扰方法, 它不仅具有拉普拉斯算符方法的直接处理的优点, 且在计算上更简单.

1 原理

考虑图 1 所示的数字全息光路, 物体位于 x_0-y_0 面内, 经平行光照射后与倾角为 θ 的参考平行光波发生干涉, 在距离为 d 的 $x-y$ 平面上由光敏元件 CCD 记录其全息图样. 设全息面上物光复振幅为 $O(x, y)$, 离轴参考光为 $R_0 \exp(-j2\pi\alpha x)$, 其中载频 $\alpha = \sin \theta / \lambda$, 那么 $x-y$ 平面上的光强分布函数为

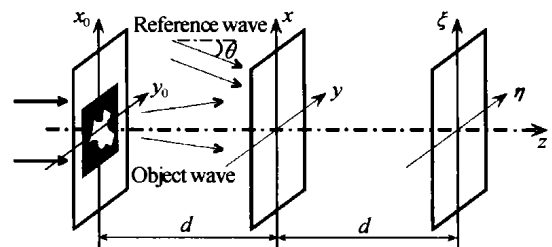


图 1 数字离轴全息成像的原理

Fig. 1 Principle of off-axis digital holography

$$I(x, y) = R_0^2 + |O(x, y)|^2 + R_0 O(x, y) \cdot$$

$$\exp(j2\pi\alpha x) + R_0 O^*(x, y) \exp(-j2\pi\alpha x) \quad (1)$$

然后用数字计算机模拟计算当利用参考光对 $x-y$ 平面上全息图再现时, 距全息图 d 处的再现平面 $\xi-\eta$ 上光场分布.

对式(1)表示的全息图进行数字再现, 第一项与第二项合起来构成零级衍射干扰, 第三项与第四项分别表示物体的真实像与共轭像. 下面即分析采用数字图像处理的微分算法对零级干扰进行消除的原理. 在数字图像处理领域, 微分操作是空间域的图像锐化增强方法^[10], 其中基于一阶微分的梯度法可滤去图像的低频信息, 对上述的数字全息图进行

微分操作可达到消零级的目的. 此方法计算简单, 处理后图像与原始图像像素值的关系为

$$G[f(x,y)] = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \approx$$

$$G_x(I) = |I(x+\Delta x, y) - I(x, y)| = \left| |O(x+\Delta x, y)|^2 - |O(x, y)|^2 + R_0 \{ O(x+\Delta x, y) \exp [j2\pi\alpha(x+\Delta x)] + O^*(x+\Delta x, y) \exp [-j2\pi\alpha(x+\Delta x)] - O(x, y) \exp (j2\pi\alpha x) - O^*(x, y) \exp (-j2\pi\alpha x) \} \right| \approx \left| |O(x+\Delta x, y)|^2 - |O(x, y)|^2 + R_0 \{ [O(x+\Delta x, y) - O(x, y)] \exp (j2\pi\alpha x) + [O^*(x+\Delta x, y) - O^*(x, y)] \exp (-j2\pi\alpha x) \} \right| \quad (3)$$

式(3)中已取 $\exp(\pm j2\pi\alpha\Delta x) \approx 1$. 令 $O(x, y) = o(x, y) \exp [j\phi(x, y)]$, 记 Δx 为相对小量, 对 $\phi(x, y)$ 影响很小, 则式(3)化为

$$G_x(I) = |o^2(x+\Delta x, y) - o^2(x, y) + 2R_0[o(x+\Delta x, y) - o(x, y)] \cos \Phi(x, y)| \quad (4)$$

式中 $\Phi(x, y) = \phi(x, y) + 2\pi\alpha x$. 对物光波振幅采取泰勒级数展开, 并略去高阶项, 代入式(4), 得到

$$G_x(I) = \left| \Delta x \frac{\partial}{\partial x} [o^2(x, y)] + 2R_0 \left[\Delta x \frac{\partial}{\partial x} o(x, y) \right] \cdot \cos \Phi(x, y) \right| \quad (5)$$

为方便推导, 此时可利用类似文献[8]的分析方法, 即取 $K(x, y) = o^2(x, y)/R_0^2$ 代入式(1)和式(5), 并作简化, 令 $R_0^2 = 1$

$$I(K) = F_1(K) [1 + F_2(K) \cos \Phi] \quad (6)$$

$$G_x[I(K)] = F_3(K) |1 + F_4(K) \cos \Phi| \quad (7)$$

其中

$$F_1(K) = 1 + K, F_2(K) = \frac{2K^{1/2}}{1 + K} \quad (8)$$

$$F_3(K) = |\Delta x \frac{\partial K}{\partial x}|, F_4(K) = \frac{1}{K^{1/2}}$$

为比较式(6)与(7), 只需比较(8)的四个参量. 对比 F_1 和 F_3 的结果是微分处理后的全息图具有较小的平均光强分布; 而分析 F_2 和 F_4 的表达式可知, 正负一级像光强在初始全息图中不能超越零级, 但在经过处理的全息图中却可以超越零级. 如图2所示, 其中值为1的直线表示零级, K 值小于1时 F_4 将超越零级. 因此在后面的数字再现结果中将会看

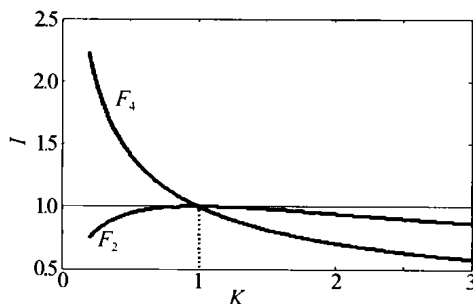


图2 全息图处理前后的参量比较
Fig. 2 Function comparison between the original hologram and the processed hologram

$|f(i+1, j) - f(i, j)| + |f(i, j+1) - f(i, j)|$ (2)
设像素尺寸为 Δx 和 Δy , 将式(2)对全息图式(1)操作, 并以一维 x 方向为例, 有

到, 微分梯度处理不仅削弱了零级干扰, 还使真实像的清晰度明显增强. 二维的情况还需考虑 y 方向的影响, 但最终仍归结为参量比较得到类似的结果.

微分梯度操作对全息图的影响还可以采用频谱分析. 取 $\Delta x = \Delta y = \delta$, 则处理后全息图

$$G[I(x, y)] = |I(x, y) - I(x+\delta, y)| + |I(x, y) - I(x, y+\delta)| \quad (9)$$

做傅里叶变换考察其频谱, 得到

$$\tilde{I}(f_x, f_y) = DFT[G(I)] = |\tilde{I}(f_x, f_y) - \tilde{I}(f_x, f_y) \cdot \exp(j2\pi\delta f_x)| + |\tilde{I}(f_x, f_y) - \tilde{I}(f_x, f_y) \cdot \exp(j2\pi\delta f_y)| \quad (10)$$

式中 $\tilde{I}(f_x, f_y)$ 为原始全息图的傅里叶频谱. 以 x 方向为例, 考察一维频谱

$$\tilde{I}(f_x) = \tilde{I}(f_x) |1 - \exp(j2\pi\delta f_x)| \quad (11)$$

由上式易知在零频附近 ($f_x = 0$) 调制函数 $|1 - \exp(j2\pi\delta f_x)|$ 趋于零, 因此对于全息图的零级具有削减作用. 若对式(11)取实部, 调制函数为 $|1 - \cos(2\pi\delta f_x)|$, 对全息图的作用如图3所示. 图中虚线的三角和矩形分别对应式(1)中第二项物光自相关和正负一级像的频谱, 零点的粗线脉冲函数代表第一项直透光的频谱, 这些合起来是 $\tilde{I}(f_x, f_y)$, 调整光路如图使各频谱相邻, 以便充分发挥光敏元件的分辨能力; 实曲线表示函数 $|1 - \cos(2\pi\delta f_x)|$, 它对全息图的零级衍射干扰有一定的去除作用, 并可调整光路使其尽量不影响两边的一级像频谱.

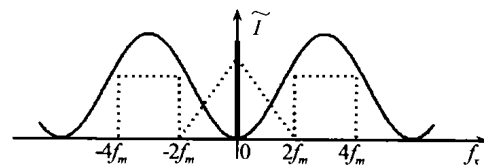


图3 对微分算法处理数字全息图的频谱分析
Fig. 3 Analysis of spectrum of digital processed holograms

我们同样可以利用 Roberts 提出的交叉微分梯度算法^[10]处理全息图, 其分析方法与上述过程相同, 再现结果将在下面一并给出.

2 数字处理结果

为了便捷有效地考察微分算法的处理结果,我们采用计算机模拟离轴参考光记录数字全息图并进行数字再现. 这一数字实现过程我们参考了离散菲涅尔衍射公式^[2]以及改进的菲涅尔衍射理论^[11]进行计算,处理结果如下列图示,其中包括对原始物体数字全息图计算得到的零级与一级再现像,以及分别应用微分的两种梯度算法和文献[9]的拉普拉斯算法处理全息图的结果. 为了更清晰并方便地观察研究针对干扰的去除效果以及真实像像质的改善情况,这里对零级像和真实像分别进行了数字实现. 图4为原物图像,内容是英文字母“ABC”,由像素点构成. 原始全息图样以及用各方法处理后的全息图样如图5所示,其再现的零级和一级像分别对应图6和图7中. 从再现结果比较中可以看出,未经处理的全息图再现像中零级像很亮(图6(a)),而真实像则模糊不清(图7(a));微分梯度算法处理的零级像(图6(b)、(c))对于直透光项(傅里叶频谱中较接近于零)的处理效果是很显著的,仅对自相关项的去除上不是很均匀;在真实像的像质方面,微分梯度算法处理后的再现图像有着明显的改善,起到了一定的再现图像增强作用(图7(b)、(c)),



图4 原物图像
Fig.4 Object plane

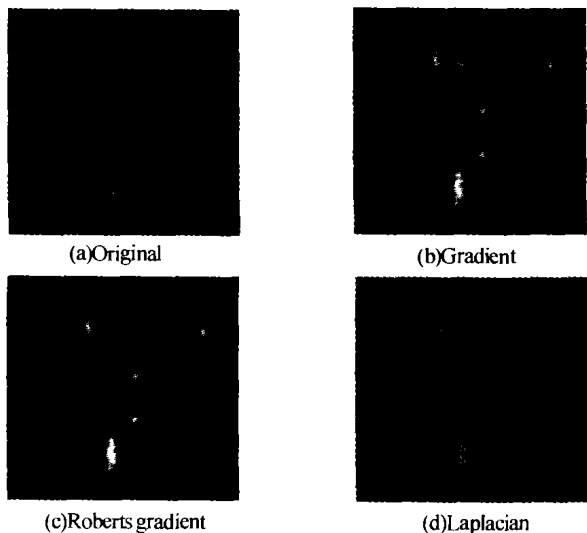


图5 数字模拟记录的全息图
Fig.5 The recorded digital hologram

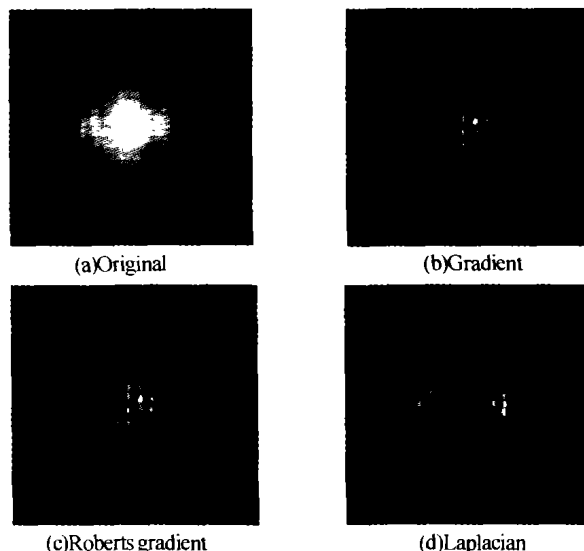


图6 数字全息零级再现像
Fig.6 Order 0 reconstructions

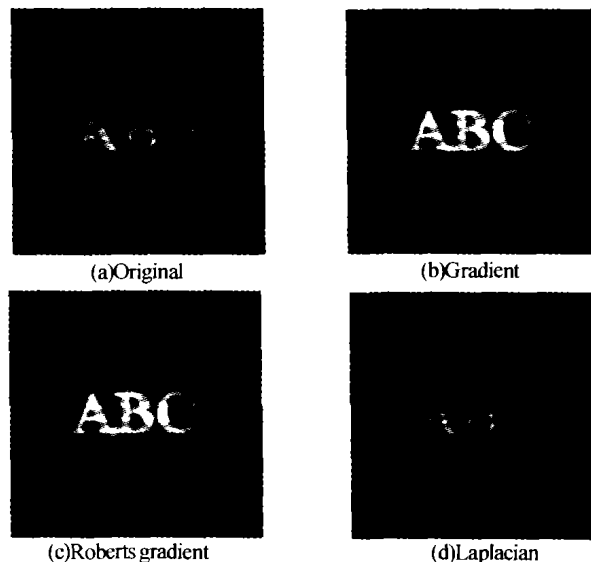


图7 数字全息一级再现像
Fig.7 Order 1 reconstructions

而拉普拉斯算法处理则对于真实像的影响较小(图7(d)),这与上面对式(6)和(7)的分析结果一致.

3 结论

本文利用基于数字图像处理的微分梯度方法预先对数字全息图进行空间域的图像增强操作,研究了对此方法处理过的数字全息图进行再现的图像的性质. 经过空间域与频域两方面的理论分析的结果以及计算机数字实现的实验结果都表明,微分梯度算符处理对于消除全息再现时的零级衍射干扰尤其在提高真实像像质方面是一种有效的方法,而且其算法的实现仅需要数字计算机的编程计算,对光学器件等装置不作额外要求,数字计算过程也更加简单,因此具有一定的实验应用价值.

参考文献

1 Schnars U, Jüptner W. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction. *App Opt*, 1994, **33**

- (2):179 ~ 181
- 2 Takaki Y, Ohzu H. Fast numerical reconstruction technique for high-resolution hybrid holographic microscopy. *App Opt*, 1999, **38**(11): 2204 ~ 2211
 - 3 Goodman J W. Introduction to Fourier Optics. McGraw-Hill, New York, 1968. 208 ~ 225
 - 4 刘诚, 刘志刚, 薄峰, 等. 数字全息中再现像分离问题的研究. 光子学报, 2003, **32**(5): 588 ~ 591
Liu C, Liu Z G, Bo F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 588 ~ 591
 - 5 孙萍, 谢敬辉, 蒋玉蓉, 等. 光学扫描全息术中的孪生像噪声及消除. 光子学报, 2003, **32**(3): 340 ~ 343
Sun P, Xie J H, Jiang Y R, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 340 ~ 343
 - 6 Lai S, King B, Neifeld M A. Wave front reconstruction by means of phase-shifting digital in-line holography. *Opt Com*, 2000, **173**: 155 ~ 160
 - 7 Takaki Y, Kawai H, Ohzu H. Hybrid holographic microscopy free of conjugate and zero-order images. *App Opt*, 1999, **38**(23): 4990 ~ 4996
 - 8 Demoli N, Meštrovic J, Sovic I. Subtraction digital holography. *App Opt*, 2003, **42**(5): 798 ~ 804
 - 9 刘诚, 李银柱, 李良钰, 等. 数字全息测量技术中消除零级衍射像的方法. 中国激光, 2001, **28**(11): 1024 ~ 1026
Liu C, Li Y Z, Li L Y, et al. *Chinese Journal of Laser*, 2001, **28**(11): 1024 ~ 1026
 - 10 Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. 134 ~ 137
 - 11 Morucci S, Noirard P, Grossetie J C. Improvement of fresnel computer-generated holograms. *Opt Com*, 1997, **134**: 25 ~ 30

Zero-order Image Elimination in Digital Holography by Means of Image Processing

Zeng Ran, Zhao Haifa, Liu Shutian

Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001

Received date: 2003-09-24

Abstract A new method to eliminate the zero-order disturbance in reconstruction of digital hologram is proposed in this paper. The method is based on digital image processing free of any extra optical element, and proved to be simple and advantageous to improvement of the desired image quality. The theoretical analysis is given and digital experimental results presented.

Keywords Digital holography; Zero-order image; Image processing

Zeng Ran was born in 1980, in Harbin, Heilongjiang Province. He now studies towards a B. S. degree in the department of physics, Harbin Institute of Technology.

