

文章编号 1004-924X(2012)09-1877-06

同态滤波法抑制离轴数字全息零级项

杨 勇^{1*}, 薛东旭¹, 盖 琦², 吴永丽¹, 马忠洪¹

- (1. 南开大学 现代光学研究所 光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071;
2. 天津理工大学 中环信息学院, 天津 300380)

摘要:针对离轴数字全息图受记录器件像元尺寸的限制而在数字再现时存在再现像受零级项串扰的问题,提出了一种抑制离轴数字全息零级项的方法。根据图像灰度可由图像照度及表面反射率共同决定的原理,将全息图看作入射分量和反射分量的乘积,利用入射分量变化缓慢且集中在低频段,反射分量反映图像细节并集中在高频段的特性,用同态滤波方法处理数字全息图。设计了同态滤波器,其上下限分别为 0.001 和 1,直径为 300 pixel。用该方法实现了对衍射距离为 34 cm 的非涅尔数字全息图的零级项抑制,并对重构出的物光对比度以及物体的细节信息进行了增强。

关键词:离轴数字全息;同态滤波;再现像;零级项

中图分类号:O438.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122009.1877

Suppression of zero-order image in off-axis digital holography based on homomorphic filtering

YANG Yong^{1*}, XUE Dong-xu¹, GE Qi², WU Yong-li¹, MA Zhong-hong¹

- (1. Key Laboratory of Optical Information Science and Technology of the Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China;
 2. Zhonghuan Information College, Tianjin University of Technology, Tianjin 300380, China)
- * Corresponding author, E-mail: yangyong@nankai.edu.cn

Abstract: In consideration of the crosstalk between reconstructed image and zero-order image existed in the digital reconstruction for off-axis digital holography, this paper presents a method to suppress the zero-order image. Based on the principle that the pixel gray-scale of the image is decided both by the image illumination and surface reflectance, the hologram is considered as a product of the incident and reflected components. The incident components which change slowly are mainly concentrated in the low-frequency region, and the reflected components which determine the detail of the image are concentrated in the high-frequency region. A reasonable homomorphic filter with the upper and lower limits of 0.001 and 1 respectively and a diameter of 300 pixel is designed and processed into the hologram. The results show that the zero-order image can be suppressed with only one Fresnel digital hologram at a distance of 34 cm. Meanwhile, the contrast and the details of reconstructed image at the

收稿日期:2012-04-12;修订日期:2012-05-29.

基金项目:天津市应用基础及前沿技术研究计划资助项目(No. 11JCYBJC01400)

same distance are improved.

Key words: off-axis digital holography; homomorphic filtering; reconstructed image; zero-order image

1 引言

随着计算机技术的快速发展,数字全息技术及其相关的应用研究^[1-4]倍受关注。数字全息一般采用记录器件(如 CCD)记录全息图,通过计算机模拟参考光数值再现物光波前,从而实现了全息图的记录、存储和再现的数字化。数字全息可同时记录物光场的振幅和相位信息,是一种理想的形貌和相位分布的测量方法,广泛应用于形貌测量、显微观测、信息加密等领域的研究^[5-8]。

数字全息的再现结果包括零级项、再现像和共轭像。零级项和共轭像的存在对再现像的分辨率会造成很大影响,特别是零级项,由于占据了很大一部分能量而在屏幕中央形成一个大亮斑,导致再现像的质量严重下降。为了消除零级项,目前已有多种实验以及数值消零级方法。实验方法如相移法,一般采用四步或三步相移的方法^[9]。由于该方法需要精密相移装置和采集多幅全息图,使其造价高但仅能用于探测静态的样品。数值方法大体可分为频域处理与空域处理。基于频域滤波的方法,如高通滤波法^[10]等普遍存在滤波窗口选择困难且主观性强等问题。基于空间域的滤波方法由于计算简单,只需记录一幅全息图,且不需要添加相移设备,适于动态探测而被广泛应用于数字全息中。Li Jun chang 等人设计的空域滤波窗口后卷积再现方法^[11],能有效抑制零级项,但是该方法只适应全息图的卷积再现。采用空域均值滤波方法^[12]或有限脉冲响应滤波器^[13]可以对全息图进行多种方法再现。不过,这两种方法都存在着不足,前者在滤波模板的尺寸较大时,计算速度慢,效果不好,且采用均值滤波时物体的细节变得模糊;后者在有限脉冲响应滤波后会减弱再现像的强度,还需要采用其他方法增强图像的对比度。总体来说,由于现有的数字全息空域滤波抑制零级的方法在处理时存在全息图整体的滤波效应,使它们在抑制零级的同时,也使再

现图像的对比度减弱。

针对上述方法的不足,本文提出了一种基于同态滤波的抑制全息零级项的方法。本方法只需拍摄一幅全息图,通过对全息图进行同态滤波处理,既可以有效抑制零级项,又能重构出图像对比度增强的再现像;不仅增强了物体细节信息,而且处理速度快。理论分析和实验结果均证明了本方法的可行性。

2 理论分析

同态滤波是指根据图像由图像照度和物体表面特性(反射率)共同决定的原理,将图像看作入射分量 $i(x, y)$ 和反射分量 $r(x, y)$ 的乘积。对于给定图像 $f(x, y)$,滤波器设计使得入射分量的变化减弱,同时增强反射分量的变化。由于入射分量变化缓慢,频谱主要集中在低频段;反射分量主要反映图像的细节特性,频谱集中在高频段。对图像两边同时取对数,可以把乘法运算转换为加法运算,然后进行傅里叶变换,通过设计合适的滤波器,减弱低频成分,增强高频成分。把频率滤波和灰度变换结合起来,利用抑制亮度范围增强对比度来改善图像质量。由于照度相对变化很小,可以看作是图像的低频成份,而反射率则是高频成份。通过分别处理照度和反射率对像元灰度值的影响,达到增强阴影区细节特征的目的。

同态滤波算法的流程为:输入 $f(x, y) \Rightarrow \ln \Rightarrow \text{DFT} \Rightarrow H(u, v) * H \Rightarrow (\text{DFT})^{-1} \Rightarrow \exp \Rightarrow g(x, y)$ 输出增强图像。其中 $f(x, y)$ 表示原始图像; $g(x, y)$ 表示处理后的图像; \ln 代表对数运算; DFT 代表傅里叶变换; DFT^{-1} 代表傅里叶逆变换; \exp 代表指数运算。假设照明光的光强分布不均匀,全息图的亮度分布函数 $f(x, y)$, $H(u, v)$ 为其傅里叶变换, H 为高通滤波器,照明光的光强分布函数记为 $i(x, y)$,物场的反射函数记为 $r(x, y)$ 。则有:

$$f(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y). \quad (1)$$

为了将 $r(x, y)$ 和 $i(x, y)$ 分开,对式(1)两边取对数得:

$$\ln[f(x, y)] = \ln[r(x, y)] + \ln[i(x, y)]. \quad (2)$$

对式(2)两边做傅里叶变换:

$$\zeta\{\ln[f(x, y)]\} = \zeta\{\ln[r(x, y)]\} + \zeta\{\ln[i(x, y)]\}. \quad (3)$$

$$\text{简记为: } F(u, v) = R(u, v) + I(u, v), \quad (4)$$

其中, $F(u, v)$, $R(u, v)$, $I(u, v)$ 分别为 $\ln[f(x, y)]$, $\ln[r(x, y)]$, $\ln[i(x, y)]$ 的傅里叶变换。由于 $\ln[i(x, y)]$ 为照明光光强分函数的对数,其频谱函数 $I(u, v)$ 主要集中在低频段,而 $\ln[r(x, y)]$ 为反射光分量的对数,其频谱 $R(u, v)$ 主要集中在高频段。所以只要设计的一个合适的高通滤波器 H ,在即可消除低频成分。

在数字全息记录系统中,CCD 记录的全息图可以表示为:

$$I_H = (\phi_0 + \phi_R)(\phi_0 + \phi_R)^* = |\phi_0|^2 + |\phi_R|^2 + \phi_0 \phi_R^* + \phi_0^* \phi_R. \quad (5)$$

这里: ϕ_0 代表物光复振幅, ϕ_R 为参考光复振幅。对式(5)等号右边变换并整理得:

$$I_H = |\phi_R|^2 \left[1 + \frac{\phi_0}{\phi_R} \right] \left[1 + \frac{\phi_0}{\phi_R} \right]^*. \quad (6)$$

式(6)全息图可以看成入射分量 $|\phi_R|^2$ 与反射分量 $\left[1 + \frac{\phi_0}{\phi_R} \right] \left[1 + \frac{\phi_0}{\phi_R} \right]^*$ 的乘积。可以用同态的方法流程处理数字全息图,起到抑制低频即零级与增强高级项的作用。对式(6)两边取对数得:

$$\ln(I_H) = \ln(|\phi_R|^2) + \ln \left[\left[1 + \frac{\phi_0}{\phi_R} \right] \left[1 + \frac{\phi_0}{\phi_R} \right]^* \right]. \quad (7)$$

对式(7)做傅里叶变换:

$$\begin{aligned} & \zeta\{\ln[I_H]\}(u, v) \\ &= \zeta\{\ln[|\phi_R|^2]\}(u, v) + \\ & \zeta\left\{\ln\left[\left[1 + \frac{\phi_0}{\phi_R}\right]\right]\right\}(u, v) + \\ & \zeta\left\{\ln\left[\left[1 + \frac{\phi_0}{\phi_R}\right]^*\right]\right\}(u, v). \end{aligned} \quad (8)$$

设计高通滤波器 H ,在抑制中间零级项的同时,增强再现像强度从而增加图像整体的对比度,达到增强再现物体阴影区细节的目的。为达到抑制低频、增强高频的目的,设计了一个对低频和高

频分量影响不同的滤波函数 $H(u, v)$,其特性曲线如图 1 所示。

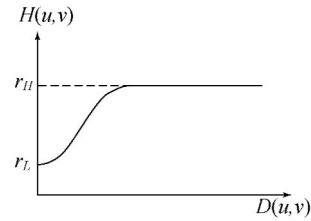


图 1 同态滤波函数特性曲线示意图

Fig. 1 Curve of homomorphic filter function

当指定截止频率 D_0 和参数 r_L, r_H, c 时,滤波函数可表示为:

$$H(u, v) = (r_H - r_L) \left[1 - e^{-\frac{D^2(u, v)}{D_0^2}} \right] + r_L. \quad (9)$$

其中, r_L 和 r_H 的取值决定了滤波器对低频和 高频分量的影响, c 用来控制滤波函数斜面的锐化程度。若选择 $r_L < 1, r_H > 1$,则滤波函数必将同时实现抑制低频和增强高频的目的,滤波以后的结果在压缩图像动态范围的同时增强图像的对比度。特殊情况下,当 $r_L = 0, r_H = 1, c = 0.5$ 时,滤波函数将成为高斯型高通滤波器。

3 实验结果与分析

本文实验采用的光路如图 2 所示:光源为 He-Ne 激光器,光波波长为 633 nm,功率为 5 mW。全息图用 CCD 接收,CCD 型号为 CMLN-13S2M/C,像元尺寸为 $3.75 \mu\text{m}$,像素数为 1280×960 。拍摄的物体为正方体骰子,边长约为 1 cm,与 CCD 靶面的距离为 34 cm。CCD 接受骰子的反射及散射光与参考光进行干涉,记录的非涅尔全息图如图 3 所示。

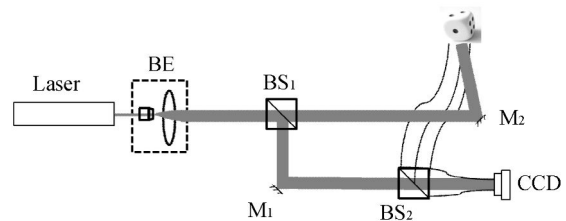


图 2 记录全息图的实验光路
Fig. 2 Experimental setup

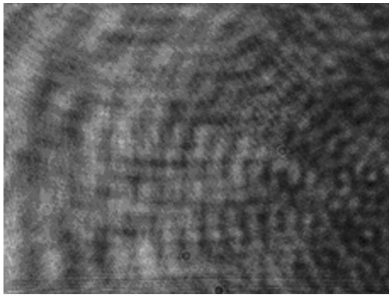


图 3 实验获得的菲涅尔全息图
Fig. 3 Obtained Fresnel hologram

根据参考文献[14],选取同态滤波器的参数 $D_0=300$, $r_L=0.001$, $r_H=1$, $c=2$ 。用同态滤波器对图 3 所示全息图进行滤波,进而得到其再现像。为了验证本滤波器参数选取的正确性,本文对比研究了在 $D_0=200$, $D_0=400$ 时的再现像,分别如图 4(a)、(b)所示。第二象限像为+1 级像,中心为 0 级再现像,第四象限为共轭像,因为在再现距离 34 cm 处离焦,不能成清晰的像。对比图 4(a)、

(b)可知,在 $D_0=200$ 时,再现像中央零级项的抑制不够彻底。在 $D_0=400$ 时,虽然图 4(b)零级项的抑制要略微强于图 4(a),但是图像的整体对比度要小于在 $D_0=300$ 条件下获得的再现像,如图 4(c)所示。由此证明了本参数选取的正确性。

为做对比研究,本文获得数字全息未消零级的再现像如图 4(d)所示,零级项在图像中间。对比图 4(c)、(d),可以看出,图 4(c)所示的零级项得到明显抑制,并且再现图像的强度有了明显增强。本文还使用一种空域滤波方法的拉普拉斯算子处理全息图^[15],滤波再现像如图 4(e)所示。可以看出,经空域滤波后零级亮斑得到抑制,但是图像的整体对比度大大下降。因此后续还需要用数字图像处理的方法增强其对比度。综合对比可知,经本文同态滤波处理后的全息图再现像既抑制了零级项又增强了图像的对比度,从而验证了本方法的可行性。

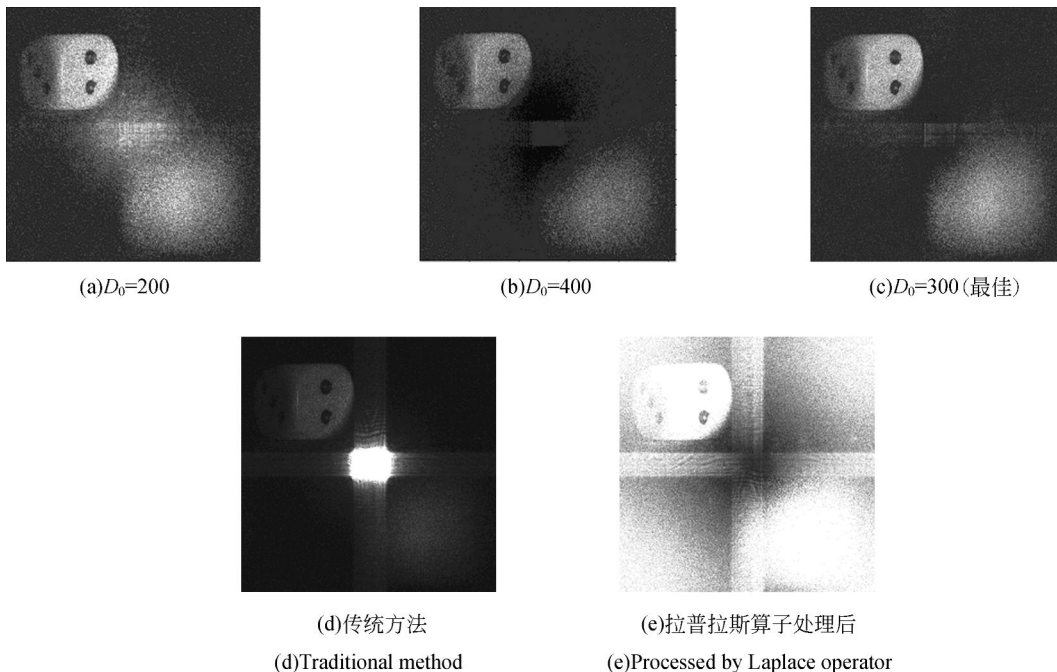


图 4 在衍射距离 34 cm 下获得的再现像
Fig. 4 Reconstructed images at diffraction distance of 34 cm

4 结 论

本文提出了一种利用同态滤波法抑制离轴数字全息零级项的方法。本方法在仅需拍摄一幅数字全息图,通过设计出上下限分别为0.001和1,

直径为300 pixel的同态滤波器,处理了衍射距离为34 cm的非涅尔数字全息图。在抑制零级项的同时,重构出增强了图像对比度的物光。该方法具有增强物体细节信息,计算过程简单,计算速度快的特点,不仅适用于现有的各种离轴数字全息应用领域,还可应用于动态过程的实时检测。

参考文献:

- [1] JAVIDI B, KIM D. Three-dimensional-object recognition by use of single-exposure on-axis digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(3):236-238.
- [2] QUAN C, TAY C J, CHEN W. Determination of displacement derivative in digital holographic interferometry[J]. *Opt. Commun.*, 2009, 282(5), 809-815.
- [3] 黎发志,罗霄,赵晶丽,等.离轴非球面的计算全息图高精度检测技术[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4):709-716.
LI F ZH, LUO X, ZHAO L J, *et al.*. Test of off-axis aspheric surfaces with CGH[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4):709-716. (in Chinese)
- [4] 宋静,梁宏亮,彭增辉,等.全息方法制备嵌段式液晶弹性体[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10):2373-2378.
SONG J, LI H L, PENG Z H, *et al.*. Fabrication of triblock liquid crystal elastomer by holography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10):2373-2378. (in Chinese)
- [5] 黄明举,姚华文,陈仲裕,等.新型绿光敏感光致聚合物高密度全息存储特性[J]. *物理学报*, 2002, 51(11):2536-2540.
HUANG M J, YAO H W, CHEN ZH Y, *et al.*. Study on the character of novel green light sensitive high-density digital holographic photopolymer[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2002, 51(11):2536-2540. (in Chinese)
- [6] MATHEW S S I C O, LOZA-ALVAREZ M P. Real time imaging of femtosecond laser induced nanoneurology dynamics in *C elegans*[J]. *Opt. Express*, 2010, 18:364-377.
- [7] 胡浩丰,王晓雷,郭文刚,等.强飞秒激光烧蚀石英玻璃时间分辨光学诊[J]. *物理学报*, 2011, 60(1):017901.
HU H F, WANG X L, GUO W G, *et al.*. Time-resolved optical diagnosis of intense femtosecond laser ablation of silica glass[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2011, 60(1):017901. (in Chinese)
- [8] 王涛,于瀛洁,郑华东.彩色全息光电再现倍率色差的消除[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4):1414-1420.
WANG T, YU Y J, ZHANG H D. Removal of magnification chromatism in optoelectronic full color holography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4):1414-1420. (in Chinese)
- [9] TAKAKI Y, KAWAI H, OHZU H. Hybrid holographic microscopy free of conjugate and zero-order images[J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(23):4990-4996.
- [10] LIU C, LI Y, CHENG X, *et al.*. Elimination of zero-order diffraction in digital holography [J]. *Opt. Eng.*, 2002, 41:2434-2437.
- [11] LI J C, PENG Z J, PATRICE T, *et al.*. Design of the spatial filter window for digital holographic convolution reconstruction of object beam field[J]. *Opt. Commun.*, 2010, 283(21):4166-4170.
- [12] 朱余良,周皓,顾济华.离轴数字全息零级像的空域滤波预处理消除法[J]. *激光与红外*, 2010, 40(7):795-798.
ZHU Y L, ZHOU H, GU J H. A pre-process method based on spatial filter for zero-order image elimination in digital off-axis holography[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(7):795-798. (in Chinese)
- [13] 刘雯雯,戴宜全,康新,等.基于有限脉冲响应滤波器的数字全息零级像消除[J]. *光学学报*, 2008, 28(5):856-859.
LIU W W, DAI Y Q, KANG X, *et al.*. Zero-order image elimination in digital hologram based on finite impulse response filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5):856-859. (in Chinese)
- [14] 马奕,张成义.基于Matlab的同态滤波器的优化设计[J]. *应用光学*, 2010, 31(4):584-588.
MA Y, ZHANG CH Y. Optimal design of homomorphic filter based on Matlab[J]. *Journal of Ap-*

plied Optics, 2010, 31(4): 584-588. (in Chinese)

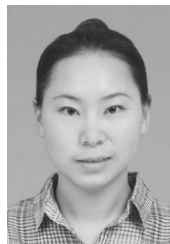
- [15] 刘诚, 李银柱, 李良钰, 等. 数字全息测量技术中消除零级衍射像的方法[J]. 中国激光, 2001, 28(11), 1024-1026.

LIU CH, LI Y ZH, LI L Y, *et al.*. A new way to eliminate the zero-order image in digital holography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28(11): 1024-1026. (in Chinese)

导师简介:



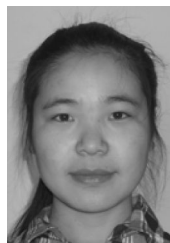
杨 勇(1972—),男,天津人,博士,副教授,2001年于天津大学获得博士学位,主要从事数字全息、三维成像与显示等方面的研究。E-mail: yangyong@nankai.edu.cn



吴永丽(1987—),女,河南安阳人,硕士研究生,2010年于河南大学获得学士学位,主要从事数字全息方面的研究。E-mail: 333wuyongli@163.com



薛东旭(1988—),男,山东济宁人,硕士研究生,2009年于山西大学获得学士学位,主要从事数字全息方面的研究。E-mail: dongxuxue@gmail.com



马忠洪(1987—),女,山东日照人,博士研究生,2009年于西北工业大学获得理学学士学位,主要从事数字全息方面的工作。E-mail: zhonghong052958@126.com



盖 琦(1972—),女,山东青州人,博士,2009年于南开大学获得博士学位,主要研究方向为彩色图像的加密及隐藏。E-mail: geqiqd@126.com