

基于 $4f$ 系统的 Gabor 同轴相移数字全息

杜延龙¹ 王玉荣^{1,2} 孟祥峰¹ 杨修伦¹ 刘迪¹ 李杰¹

(¹ 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100; ² 山东省激光技术与应用重点实验室, 山东 济南 250100)

摘要 传统 Gabor 同轴全息中的直透参考光波与衍射物光波空间重叠,因而无法实现相移干涉。针对这一问题,提出了一种在 Gabor 同轴全息中引入相移的数字全息方法。根据空间频谱域中不同频率分量空间分离的特点,通过在 $4f$ 系统的频谱面上采用纯相位空间光调制器对空间频谱的零频分量(直透参考光波)单独进行相位调制实现相移干涉,然后利用相移干涉算法得到再现像。理论分析和实验结果表明,基于 $4f$ 系统的 Gabor 同轴相移数字全息方法可以在保留 Gabor 同轴全息光路简单、受环境振动和空气扰动影响小、对光源相干性和记录器件空间分辨率要求较低等优点的基础上,消除直流项和共轭像的影响,提高了再现像质量。

关键词 全息;傅里叶光学;Gabor 同轴数字全息;相移干涉测量术;光学 $4f$ 系统;空间光调制器

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.060902

Gabor In-Line Phase-Shifting Digital Holography Based on $4f$ System

Du Yanlong¹ Wang Yurong^{1,2} Meng Xiangfeng¹ Yang Xiulun¹ Liu Di¹ Li Jie¹

(¹ School of Information Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan, Shandong 250100, China)
(² Shandong Province Key Laboratory of Laser Technology and Application, Ji'nan, Shandong 250100, China)

Abstract In traditional Gabor in-line holography, direct passing reference wave and diffracted object wave overlap in space, thus it is unable to realize phase-shifting interferometry. A method to realize Gabor in-line phase-shifting digital holography is presented. Based on the characteristic that different spatial frequency components are separate in the spatial frequency domain, a spatial light modulator is placed in the spatial spectrum plane of the $4f$ system to introduce phase-shift to the zero-frequency component of spatial frequency spectrum, and the corresponding phase-shifting algorithm is utilized to obtain the reconstructed image. Theoretical analysis and experimental results show that the proposed method can improve the quality of reconstructed image while retaining the original advantages of conventional Gabor in-line holography at the same time.

Key words holography; fourier optics; Gabor in-line digital holography; phase-shifting interferometry; optical $4f$ system; spatial light modulator

OCIS codes 090.1995; 070.4790; 070.5040; 030.1640

1 引言

近年来,随着面阵光电探测器件性能的不不断提高,有关数字全息技术及其在生物医学显微成像与检测、光学干涉测量、三维物体显示、光学图像加密、颗粒场检测及流体动力学分析等方面的应用研究得到了飞速发展^[1~4]。Gabor 同轴全息^[5]最大的优点是不需要采用分束器引入参考光波,直透参考光波和衍射物光波经历相同的路径或光学器件,光路简单,受环境振动和空气扰动影响小,且对光源的相干性和记录介质(或器件)的空间分辨率要求较低;其缺点是再现光波场中的直流项和共轭像与再现像在空间上重叠,从而影响再现像的像质(如分辨率和衬比度等)。为克服这一缺点,针对 Gabor 型同轴数字全息^[6~13],近年来提出了多

收稿日期: 2013-02-23; **收到修改稿日期**: 2013-03-25; **网络出版日期**: 2013-05-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61275014)、山东省科技攻关项目(2011GGH20119)和山东省自然科学基金(ZR2011FQ001)资助课题。

作者简介: 杜延龙(1987—),男,硕士研究生,主要从事信息光学方面的研究。E-mail: longna1@sina.cn

导师简介: 王玉荣(1965—),男,博士,教授,主要从事信息光学与光学干涉测量等方面的研究。

E-mail: yrw@sdu.edu.cn(通信联系人)

种基于数字图像处理技术的降低直流项和共轭像影响的方法^[7,8]及在不同距离处记录多幅全息图的方法^[9,10],这些方法尽管具有一定效果,但还不能完全消除直流项和共轭像的影响。传统的同轴相移数字全息采用相移干涉算法对多幅相移全息图进行运算获得再现像^[11,12],不仅可以消除全息再现光波场中的直流项和共轭像,而且还能充分利用记录器件的空间分辨能力,但它是双光束全息,需要采用分束器引入与物光波空间分离的参考光波,并利用相移器单独对参考光波施加特定相移量。由于在传统 Gabor 同轴数字全息中直透参考光波与衍射物光波空间上不能分离,无法单独对参考光波施加相移,因此传统同轴相移数字全息中采用的施加相移的方法不适用于 Gabor 型同轴数字全息。

本文基于阿贝二次成像理论和空间滤波原理^[13],提出了基于 $4f$ 系统的 Gabor 同轴相移数字全息,其基本思想如下:Gabor 同轴全息中的直透参考光波对应于零频空间频率分量,衍射物光波对应于高频空间频率分量,二者在空间域中不能分离,但在空间频率域中是空间分离的,因此,可以先对光波场进行傅里叶变换,在空间频谱面上采用适当的相移器件单独对零频空间频率分量施加相移,进而实现相移干涉,然后采用相移干涉算法再现物光波,从而消除直流项和共轭像的影响。本文在光学 $4f$ 系统的空间频谱面上采用可分像元控制的反射式液晶纯相位空间光调制器(P-SLM)作为相移器件对零频空间频率分量单独施加相移。该方法不仅可以很好地消除直流项和共轭像,并且保留了 Gabor 型同轴全息的光路简单、受环境振动和空气扰动影响小及对光源相干性要求低等优点,而且由于光学 $4f$ 系统的特点,没有附加相位的影响。实验结果也证实了该方法的效果。

2 原理分析

光学 $4f$ 系统如图 1 所示^[14], P_o 、 P_s 和 P_i 面分别是 $4f$ 系统的前焦面、空间频谱面和后焦面,三个面上的空间坐标分别用 (x_o, y_o) 、 (x_s, y_s) 和 (x_i, y_i) 表示; P_d 面与 P_i 面的距离为 d ,光波从 P_i 面到 P_d 面的传播为菲涅耳衍射。傅里叶变换透镜 L_1 和 L_2 的焦距分别为 f_1 和 f_2 。在 P_o 面上放置物体,在 P_s 面上得到其空间频谱,其中,零频分量位于光轴上即 P_s 面坐标原点,高频分量偏离光轴,频率越高偏离光轴越远。因此可以在频谱面 P_s 上对不同空间频率分量分别进行处理,如相移、空间滤波等。

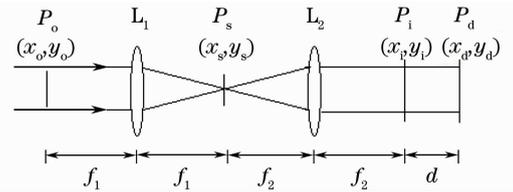


图 1 光学 $4f$ 系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of optical $4f$ system

物光波的零频分量与高频分量在频谱面上是空间分离的,所以可以将其频谱表示为

$$F(u, v) = F(0, 0)\delta(u, v) + F(u \neq 0, v \neq 0) = F(0, 0)\delta(u, v) + F_h(u, v), \quad (1)$$

式中 (u, v) 表示空间频率坐标系, $F(0, 0)\delta(u, v)$ 是位于光轴上的零频分量, $F_h(u, v) = F(u \neq 0, v \neq 0)$ 是位于光轴之外的高频分量。对零频分量施加相移,设施加的相移量为 α (α 一般为 $0 \sim 2\pi$ 之间的常量),相移后的频谱可表示为

$$F'(u, v) = F(0, 0)\delta(u, v)\exp(i\alpha) + F_h(u, v). \quad (2)$$

经透镜 L_2 再次进行傅里叶变换后在 P_i 面上得到的光波场分布可表示为

$$f_i(x_i, y_i) = A_0 \exp(i\alpha) + f_h(x_i, y_i). \quad (3)$$

(3) 式中,右端第一项是沿光轴传播的平面波,对应于物光波场(或像光波场)中的零频分量;第二项对应于物光波场(或像光波场)中的高频分量。从 P_i 面到 P_d 面是菲涅耳衍射,略去复常数 $\exp(ikd)/(i\lambda d)$, P_d 面上的光场分布 $f_d(x_d, y_d)$ 为

$$f_d(x_d, y_d) = A_0 \exp(i\alpha) + f_{\text{FRT}}(x_d, y_d) = A_0 \exp(i\alpha) + A(x_d, y_d)\exp[i\phi(x_d, y_d)], \quad (4)$$

式中 $f_{\text{FRT}}(x_d, y_d) = F_{\text{FRT}}\{f_h(x_i, y_i)\} = A(x_d, y_d)\exp[i\phi(x_d, y_d)]$, $F_{\text{FRT}}\{\cdot\}$ 表示菲涅耳衍射变换, $A(x_d, y_d)$ 和 $\phi(x_d, y_d)$ 分别是 $f_{\text{FRT}}(x_d, y_d)$ 的振幅分布和相位分布。(4) 式右端的第一项和第二项分别作为 Gabor 同轴全息中的直透参考光波和衍射物光波,二者干涉形成的干涉图(全息图)的强度分布为

$$I(x_d, y_d) = A_0^2 + A^2(x_d, y_d) + 2A_0 A(x_d, y_d)\cos[\phi(x_d, y_d) - \alpha]. \quad (5)$$

采用适当的相移器依次对零频分量施加不同的相移量,则可依次得到多幅相移干涉图。由多幅相移干

涉图并采用相应的相移干涉算法^[15],就可得到 P_d 面上菲涅耳衍射光场的振幅分布 $A(x_d, y_d)$ 和相位分布 $\phi(x_d, y_d)$,从而得到 P_d 面上的衍射物光波 $f_{\text{FRT}}(x_d, y_d)$,再由逆菲涅耳衍射就可得到 P_i 面上的光波场分布 $f_h(x_i, y_i)$,即

$$f_h(x_i, y_i) = F_{\text{FRT}}^{-1}\{f_{\text{FRT}}(x_d, y_d)\}, \quad (6)$$

式中 $F_{\text{FRT}}^{-1}\{\cdot\}$ 表示逆菲涅耳衍射变换。由 P_i 面上的光波场分布 $f_h(x_i, y_i)$ 就可以得到再现像或进行检测测量。

为了在光学 $4f$ 系统的频谱面上对零频分量施加相移,需在频谱面上放置可分像元控制的 P-SLM。基于 $4f$ 系统实现同轴相移数字全息记录的光路结构形式可有多种,如图 2 所示,其中图 2(a)是采用透射式 P-SLM 的双傅里叶变换透镜光路,图 2(b)是采用反射式 P-SLM 的双傅里叶变换透镜光路,图 2(c)是采用反射式 P-SLM 的单傅里叶变换透镜光路。激光器出射束经扩束准直器 BE 变成平行光, P_o 、 P_s 和 P_i 面分别是 $4f$ 系统的前焦面、空间频谱面和后焦面,在 P_d 面上用面阵光电探测器(如 CCD 等)记录全息图, O 为物体, L 是傅里叶变换透镜, BS 是分束器。图 2(a)和(b)所示光路可以通过灵活选取 L_1 和 L_2 的焦距改变物像放大率;图 2(c)所示光路中两次傅里叶变换共用一个傅里叶变换透镜,物像放大率为 1,光路结构简单,可进一步减小机械振动及空气扰动的影响。可以采用液晶 P-SLM^[16]或数字微镜空间光调制器^[17]作为在光学 $4f$ 系统频谱面上实现相移的相移器件,二者均是分立像元结构,可实现分像元独立调制。

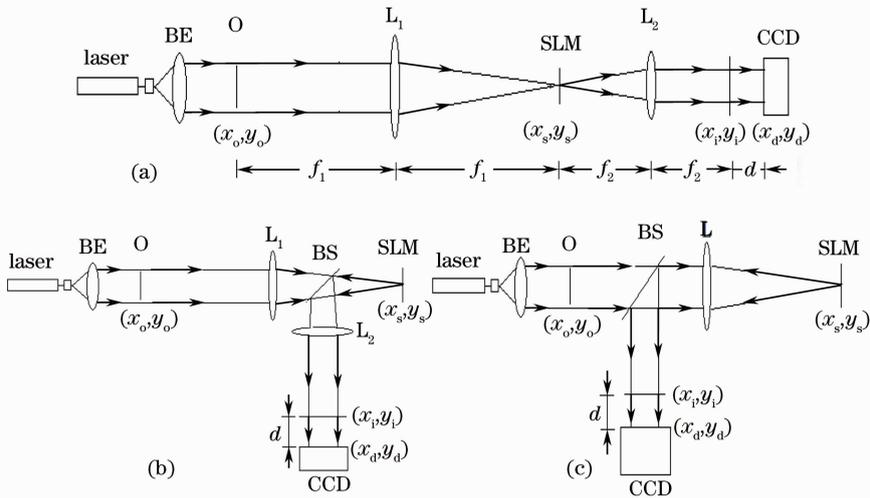


图 2 基于 $4f$ 系统的 Gabor 同轴相移数字全息光路结构形式。(a)采用透射式 P-SLM 的双傅里叶变换透镜光路;
(b)采用反射式 P-SLM 的双傅里叶变换透镜光路;(c)采用反射式 P-SLM 的单傅里叶变换透镜光路

Fig. 2 Several optical layouts of Gabor in-line phase-shifting digital holography based on $4f$ system with (a) Transmission-type P-SLM and double Fourier transform lenses; (b) reflection-type P-SLM and double Fourier transform lenses; (c) reflection-type P-SLM and single Fourier transform lens

实际系统中很难做到仅对零频分量单独实现相移,可以依据空间光调制器的像元大小,对零频分量及其附近的极低频分量单独实现相移。在图 1 所示光学 $4f$ 系统中,设透镜 L_1 的孔径为 D_1 ,其艾里斑直径为 $\frac{1.22 \lambda f_1}{D_1} \times 2$ 。图 3 所示是透镜 L_1 的孔径 $D_1 = 30$ mm、焦距 $f_1 = 300$ mm 时频谱面 P_s 上的衍射图样,艾里斑直径为 $15.44 \mu\text{m}$ 。实际系统中比较理想和可行的做法是对艾里斑所在区域的空间频率分量单独实施相移。

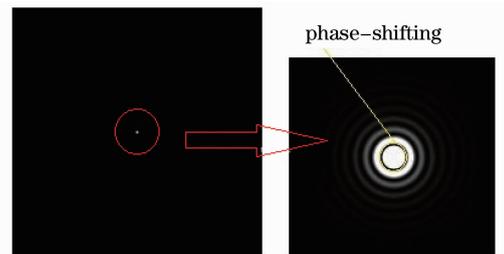


图 3 频谱面上的衍射图样及相移区域示意图
Fig. 3 Diffraction pattern and the phase-shifting region in spectrum plane

3 实验验证

实验采用图 2(c)所示的单傅里叶变换透镜光路。 P_i 面上的光场分布与物面 P_o 上的光场分布相同。激

光器波长为 $0.6328 \mu\text{m}$; 透镜 L 的孔径为 30 mm , 焦距为 300 mm ; CCD 像元大小为 $4.4 \mu\text{m}$, 靶面大小为 $1200 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$; 采用分辨率板 (USAF-1951 Resolution Test Chart) 作为物体; 全息记录面 P_a (CCD 靶面) 与 P_i 面的距离 $d=75.5 \text{ mm}$ 。实验中采用反射式液晶 P-SLM (PLUTO-VIS SLM, HOLOEYE Systems, Inc.) 作为相移器件, 其像元大小为 $8 \mu\text{m}$, 器件大小为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ 。通过编程可分别控制显示在每个像元的灰度值, 其灰度-相位调制特性曲线如图 4 所示, 图中用实际实验测量数据绘制的曲线基本呈线性变化, 但在局部有轻微的上下起伏, 这是由于实验中的环境振动或空气扰动等影响造成的; 图中还给出了由实验测量数据得到的拟合曲线。由灰度-相位调制特性曲线可以看出该 P-SLM 可实现灰度值从 0 到 255 对应于相位从 0 到 2π 的线性相位调制。

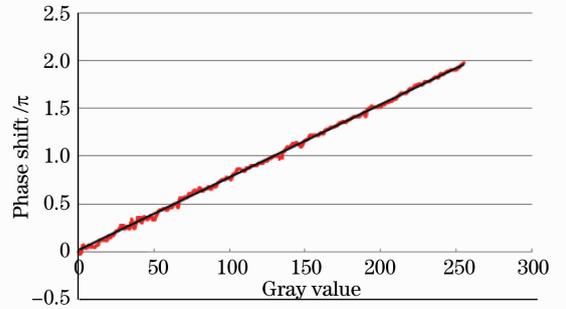


图 4 P-SLM 的灰度-相位调制特性曲线
Fig. 4 Gray level-phase modulation characteristic curve of P-SLM

实验中, 将位于 P-SLM 中心处的 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 区域作为相移区域, 其他部分的像元的灰度值置为 0 且保持不变; 采用三步相移干涉^[18], 将相移区域的灰度值依次置为 0、64 和 128, 分别对应于 0 、 $\pi/2$ 和 π 的相移量。图 5(a)~(c) 分别是相应的三幅相移干涉图 (全息图)。采用三步相移干涉算法得到的再现像如图 6(a) 所示。为了进行实验比较, 采用相同的物体、CCD 及记录距离 d , 利用传统 Gabor 同轴全息光路进行实验, 得到的再现像如图 6(b) 和 (c) 所示, 其中图 6(b) 是从全息图强度减去直透参考光波强度后的再现像, 图 6(c) 是由全息图直接再现得到的再现像。比较图 6(a)、(b) 和 (c) 可以很清楚地看到, 基于 $4f$ 系统的 Gabor 同轴相移数字全息基本消除了直流项和共轭像的影响, 再现像最清晰; 而基于传统 Gabor 同轴全息, 用减直透光方法得到的再现像中还有共轭像的影响; 用全息图直接再现得到的再现像中直流项和共轭像的影响同时存在, 再现像最差。实验结果验证了本文提出的方法的可行性和优势。

实验中, 将位于 P-SLM 中心处的 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 区域作为相移区域, 其他部分的像元的灰度值置为 0 且保持不变; 采用三步相移干涉^[18], 将相移区域的灰度值依次置为 0、64 和 128, 分别对应于 0 、 $\pi/2$ 和 π 的相移量。图 5(a)~(c) 分别是相应的三幅相移干涉图 (全息图)。采用三步相移干涉算法得到的再现像如图 6(a) 所示。为了进行实验比较, 采用相同的物体、CCD 及记录距离 d , 利用传统 Gabor 同轴全息光路进行实验, 得到的再现像如图 6(b) 和 (c) 所示, 其中图 6(b) 是从全息图强度减去直透参考光波强度后的再现像, 图 6(c) 是由全息图直接再现得到的再现像。比较图 6(a)、(b) 和 (c) 可以很清楚地看到, 基于 $4f$ 系统的 Gabor 同轴相移数字全息基本消除了直流项和共轭像的影响, 再现像最清晰; 而基于传统 Gabor 同轴全息, 用减直透光方法得到的再现像中还有共轭像的影响; 用全息图直接再现得到的再现像中直流项和共轭像的影响同时存在, 再现像最差。实验结果验证了本文提出的方法的可行性和优势。

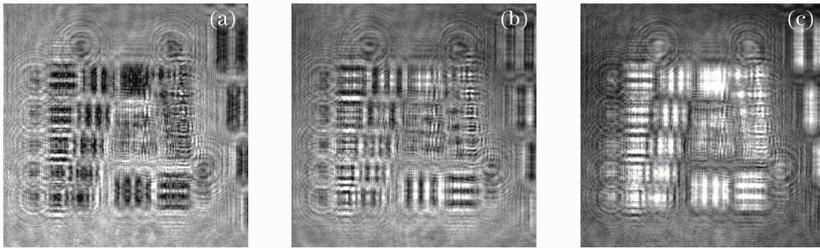


图 5 由 Gabor 同轴相移数字全息得到的相移全息图。(a) $\alpha=0$; (b) $\alpha=\pi/2$; (c) $\alpha=\pi$
Fig. 5 Holograms obtained by Gabor in-line phase-shifting digital holography based on $4f$ system, where (a) $\alpha=0$; (b) $\alpha=\pi/2$; (c) $\alpha=\pi$

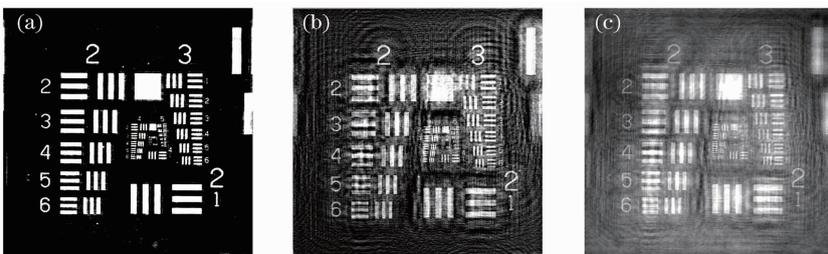


图 6 全息再现像。(a) 三步相移再现像; (b) 减去直透参考光波强度后的再现像; (c) 由全息图直接再现得到的再现像
Fig. 6 Holographic reconstructed images. (a) Using three-step phase-shifting method; (b) removing background; (c) directly reconstructing method with single hologram

4 结 论

基于空间频谱域不同频率分量空间分离的特点,提出一种采用光学 $4f$ 系统与纯相位空间光调制器的 Gabor 同轴相移数字全息方法。这种方法具有以下优点:1)在 Gabor 同轴数字全息中实现了相移干涉,消除了直流项和共轭像;2)在保留 Gabor 同轴数字全息所具有的光路简单、受环境振动和空气扰动影响小以及对光源相干性要求低等优点的同时,可提高再现像的质量和检测精度;3)适用于多种相移干涉算法;4)适用于多种不同类型的光路结构;5)由于光学 $4f$ 系统的特性,对物体进行了一定比例的缩放,而且没有附加相位的影响。本文对基于 $4f$ 系统的 Gabor 同轴相移数字全息进行了初步的原理分析和实验验证,后续还将进行深入的理论分析并开展相关应用研究。

参 考 文 献

- 1 Myung K. Kim. Applications of digital holography in biomedical microscopy[J]. *J. Opt. Soc. Korea*, 2010, **14**(2): 77~89
- 2 Zheng Huadong, Dai Linmao, Wang Tao *et al.*. Optoelectronic reconstruction of three-dimensional scenes based on multiple fractional-Fourier-transform holograms[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(2): 020901
郑华东, 代林茂, 王涛等. 三维物场多重分数傅里叶变换全息图光电再现实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(2): 020901
- 3 Zhang Zhihui, Wang Huaying, Liu Zuoqiang *et al.*. Phase unwrapping algorithms based on fast Fourier transform[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(12): 120902
张志会, 王华英, 刘佐强等. 基于快速傅里叶变换的相位解包裹算法[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(12): 120902
- 4 Li Xu, Carl C. Aleksoff, Jun Ni. High-precision three-dimensional shape reconstruction via digital refocusing in multi-wavelength digital holography[J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(15): 2958~2967
- 5 D. Gabor. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, **151**(4098): 777~778
- 6 Qi Li, Kai Xue, Yun-Da Li. Experimental research on terahertz Gabor inline digital holography of concealed objects[J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(29): 7052~7058
- 7 Yan Zhang, Giancarlo Pedrini, Wolfgang Osten. Image reconstruction for in-line holography with the Yang-Gu algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(32): 6452~6457
- 8 Denis Lebrun, Samir Belaïd, Cafer Özkul. Hologram reconstruction by use of optical wavelet transform[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(17): 3730~3734
- 9 Lu Rong, Feng Pan, Wen Xiao *et al.*. Twin image elimination from two in-line holograms via phase retrieval[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(6): 060902
- 10 Cheng-Shan Guo, Qing-Yang Yue, Gong-Xiang Wei. Laplacian differential reconstruction of in-line holograms recorded at two different distances[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(17): 1945~1947
- 11 Weiqing Pan, Wei Lu, Yongjian Zhu. One-shot in-line digital holography based Hilbert phase-shifting[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(12): 1123~1125
- 12 Kadono Hiroshi, Takai Nobukatsu, Asakura Toshimitsu. New common-path phase shifting interferometer using a polarization technique[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(5): 898~904
- 13 Joseph W. Goodman. Introduction to Fourier Optics[M]. Qin Kecheng, Liu Peisen, Chen Jiabi *et al.* Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012. 70~82
古德门. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家璧等译. 北京: 电子工业出版社, 2012. 70~82
- 14 Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics[M]. Beijing: Science Press, 1999. 21~34
苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 21~34
- 15 D. W. Phillion. General methods for generating phase-shifting interferometry algorithms[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(31): 8098~8115
- 16 Liu Yongjun, Xuan Li, Hu Lifa *et al.*. Research on high precision of phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1682~1686
刘永军, 宣丽, 胡立发等. 高精度纯相位液晶空间光调制器的研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(12): 1682~1686
- 17 Wang Xiaolei, Liu Xiangdong, Zhang Yi. A reflective spatial light modulator based on micromirror array device[J]. *J. Zhejiang University (Engineering Science)*, 2008, **42**(10): 1735~1738
王小磊, 刘向东, 张懿. 基于微镜阵列器件的反射式空间光调制器[J]. 浙江大学学报(理工版), 2008, **42**(10): 1735~1738
- 18 Lee M. Frantz, Alexander A. Sawchuk, Werner von der Ohe. Optical phase measurement in real time[J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(19): 3301~3306