

文章编号:1004-4213(2010)02-0271-4

三维场景相息图的白光再现研究*

许富洋,李勇,金洪震,王辉

(浙江师范大学 信息光学研究所,浙江 金华 321004)

摘要:讨论了相息图白光再现的可行性,得到采用在相息图和观察者之间加入狭缝的方法可实现相息图的白光再现的结论.提出了一种通过对彩虹全息图进行复数滤波来制作相息图的方法.根据彩虹全息图中物光的频谱宽度设计有限脉冲响应数字滤波器.对该滤波器进行移频,得到与通带位置物光的频谱位置一致的复系数带通滤波器.对全息图进行空域滤波,去除共轭像和零级,求出调制后物光的位相分布,制作场景相息图.实验观察到了经过此方法制作的相息图在白光下的再现像,表明本文的理论分析正确,所提出的方法可行.

关键词:信息光学;相息图;白光再现;位相失匹配

中图分类号:O438.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103902.0271

0 引言

理想情况下,相息图^[1]可把全部入射光用来重建单个像,其衍射效率可达 100%,是一种理想的波前重构元件.其在二元光学元件制作^[2-4]、光学检测^[5]、三维场景的记录和再现^[6-8]等领域得到成功的运用.但相息图很难用光学方法得到,一般都是用计算机制作.目前常用的三维场景相息图制作方法中,一种是通过全息图数字化来制作三维场景相息图^[8];另一种已知物光波分布形式,用计算机来模拟光传播过程,从而计算出相息面的物光位相来获取相息图^[9].文献[8-9]中提到的三维场景相息图的制作和再现都取得了较好的效果,但由于只能激光再现,限制了相息图在三维场景记录和再现中的应用范围.本文在分析彩虹全息图、相息图特点及制作过程的基础上,研究了三维场景相息图的白光再现问题,并提出了一种可白光再现的相息图制作方法,实验结果证明了这种方法的可行性.

1 原理

1.1 彩虹全息图特点

由全息原理可知,全息图面上光强分布可表示为

$$I = I_0^2 + I_R^2 + I_0 I_R \{ \exp[j(\phi_0 - \phi_R)] + \exp[-j(\phi_0 - \phi_R)] \} \quad (1)$$

彩虹全息图与菲涅耳全息图不同之处在于:菲

涅耳全息图中,物点的传播信息遍布整个全息图;而在彩虹全息图中,任一物点的基元全息图只占整个全息图的很小区域,即所谓的“线全息图”.在已知物体三维信息的情况下,采用计算机软件可方便地计算出其彩虹全息图.其中线全息图的位置与物点的位置以及狭缝的位置的关系如图 1.

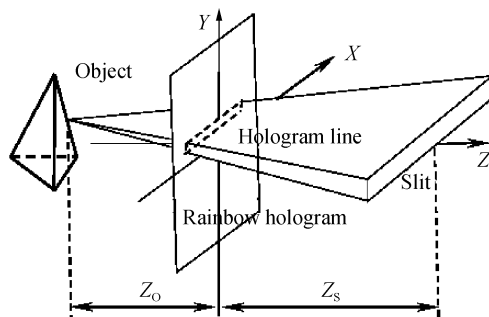


图 1 彩虹全息图原理

Fig. 1 The principle of the rainbow hologram

设狭缝的宽度为 a ,物点到全息图面的距离为 Z_0 ,狭缝与全息图面的距离为 Z_s ,则线全息图的宽度 a_H 为

$$a_H = \frac{Z_0}{Z_0 + Z_s} a \quad (2)$$

由于物点全息图的大小在铅直方向 y 上受到限制,因此,再现像在 y 方向上失去了立体感,而在 x 方向仍有体视效应.对于不同波长的光,狭缝与物体的再现像位置都不同.狭缝限制了对应于特定波长的再现像的观察位置,因此彩虹全息图可以实现白光再现.由此启发,本文讨论采用类似彩虹全息图的方法制作的相息图(称为彩虹相息图)在白光下再现的可能性.

*国家自然科学基金(60877002、60702078)和浙江省自然科学基金(Z1080030)资助

Tel:0579-82297308

Email:xfy@zjnu.cn

收稿日期:2009-07-08

修回日期:2009-10-12

1.2 相息图的白光再现

全息图的再现建立在光的衍射理论基础上,而相息图通过改变光学厚度来调制照射光波的位相分布,从而再现出原始的物光波.相息图在白光下再现的主要问题表现为位相失匹配^[1].假设再现光波的位相分布为

$$\phi_1 = \varphi_c + \frac{k_c n_c}{k_l n_l} \phi_0 \quad (3)$$

令

$$\phi_1' = \frac{k_c n_c}{k_l n_l} \phi_0 = (1 + \beta) \phi_0 \quad (4)$$

式中 k_c, k_l, n_c, n_l 分别为再现光波与相息图记录光波在干版中所对应的波数与折射率, $\beta = \frac{k_c n_c}{k_l n_l} - 1$ 确定了相息图位相失匹配的大小.

由相息图的制作过程可知,可以把相息图的记录与再现过程看成对位相函数的非线性处理,某一物点相应线全息图的非线性限幅器如图 2.

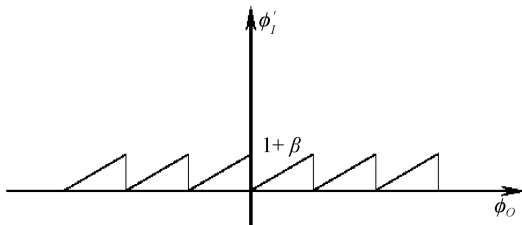


图 2 非线性限幅器的输入输出关系

Fig. 2 The input/output relationship of nonlinear limiter

ϕ_0, ϕ_1' 分别为限幅器的输入输出函数值.可以知道, ϕ_1' 是 ϕ_0 的周期函数,在一个周期内, ϕ_1' 是 ϕ_0 线性函数,且其值被限制在 $[0, 1 + \beta]$ 之间.

假设原光波的位相变化为 ϕ_0 ,则从相息图再现的波前变为 $\exp(j\phi_1')$,可将其进行傅里叶级数展开得

$$\exp(j\phi_1') = \sum_n C_n \exp(jn\phi_0) \quad (5)$$

式中

$$C_n = \text{sinc} [(1 + \beta - n)\pi] \exp[j(1 + \beta - n)\pi] \quad (6)$$

由式(5)、(6)可知,若 $\beta = 0$,则只有 $C_1 \neq 0$, $\exp(j\phi_1') = C_1 \exp(j\phi_0)$,即所希望的理想情况,此时不存在位相失匹配问题,再现光波前完全被调制成再现像波前,用于重建单个再现像.若 β 为任一整数,则非零项移至 $n = 1 + \beta$,这时再现像波前变为 $\exp(j\phi_1') = C_n \exp(jn\phi_0)$,位相变化为原物体位相的 n 倍.

而在实际实验中,采用白光再现时, β 往往不为整数,则式(5)将存在较多的非零项,亦即再现时将出现多重像.为使多重像分离,预先在相息图面上的物光位相中加入线性位相,即计算 $\phi_0 - \phi_R$,这相当于离轴全息中应用的载波技术,可使相息图再现时

产生的各级次像实现分离.由于采用类似彩虹全息图的方法,在全息图和观察者之间加入了狭缝,对应其它波长的再现像被限制,在与记录位相匹配的狭缝位置可以观察到正确的再现像,并且有最高的衍射效率.

1.3 彩虹相息图的制作方法

本文采用对彩虹全息图进行复数滤波的方法制作彩虹相息图.对式(1)进行傅里叶变换,得到的频谱如图 3,可知其包含三个频谱成份^[10]. (a)中的 $|G_0|$ 表示物的频谱分布,其带宽为 $2B$; (b)中 $|G_1|$ 对应于全息图再现当中的直透光, $|G_2|$ 为自相关像,其带宽拓展为 $4B$, $|G_3|, |G_4|$ 分别为准确再现像及共轭像,其频谱中心位于 $(0 \pm \alpha)$,带宽与物体一致.

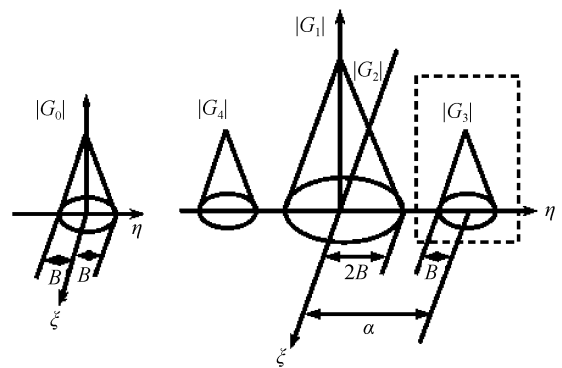


图 3 全息图频谱特点

Fig. 3 Spectrum character of hologram

由式(1)可知,全息面上再现像的复振幅分布为 $A_1 = A_0 A_R \exp[j(\phi_0 - \phi_R)]$,即图 3 中的虚线框部分,其位相分布可以用来制作彩虹相息图.根据相应的参量,可以设计适当的带通复数滤波器,在彩虹全息图面上进行空域滤波,则可获得 A_1 项,然后再求出其辐角,得到相息面上的位相分布.

带通复数滤波器设计步骤为:先设计具有式(7)幅频特性的实 FIR 低通数字滤波器

$$|H(e^{j2\pi\eta})| = \begin{cases} 2 & (-B \leq \eta \leq B) \\ 0 & (\text{其它}) \end{cases} \quad (7)$$

然后对该低通滤波器进行移频,就可以得到需要的复系数滤波器.移频的方法为,将低通滤波器的单位抽样响应乘以一个复指数序列,可以用式(8)表示这一运算过程.

$$h_{CBP}(k) = h_{LP}(k) e^{j2\pi\alpha k} \quad (8)$$

式(8)中 $h_{CBP}(k)$ 表示复数带通滤波器的单位抽样响应, $h_{LP}(k)$ 表示实低通滤波器的单位抽样响应, k 为单位抽样响应的下标.

2 实验结果及分析

为了验证本文方案的可行性与正确性,选择小

车模型进行了实验. 实验中全息图计算参量: 物体宽为 4.56 mm, 高为 2.03 mm, 纵向深度为 1.51 mm, 参考光为平行光, 入射角为 7° , 波长为 632.8 nm, 狭缝长为 100 mm, 宽为 3 mm, 全息面在物体上, 全息面与狭缝距离为 300 mm. 首先计算彩虹全息图, 然后对其进行复数滤波并求出辐角. 由于反三角函数对辐角进行了截断, 求得辐角后需进行调整, 使其在 $[0, 2\pi)$ 上. 最后转化成对应的灰度值, 通过照相缩微、漂白等流程制作出相息图. 图 4(a) 为制作全息

图时选用的小车模型, (b) 为二值化后的彩虹全息图片断, (c) 为通过上述方法处理后得到的彩虹相息图片断, (d)、(e) 分别为彩虹全息图、相息图再现像照片. 由于再现像较难拍摄, 其效果不如直接观察好. 由实验结果可以看出, 相息图的衍射效率比漂白后的彩虹全息图略低. 主要原因是在相息图的制作过程中, 干版的显影、定影、漂白等很难精确控制, 相息图的实际位相与设计位相存在较大误差, 再现光的能量被分配到高级次再现像及零级上.

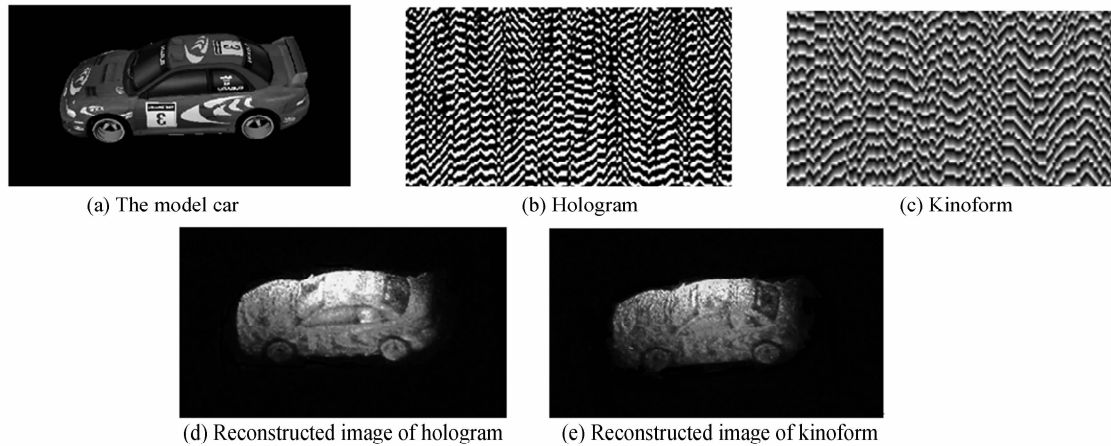


图 4 实验结果

Fig. 4 Experimental results

3 结论

本文讨论了相息图在白光下再现的可行性, 得到了在相息图和观察者之间加入狭缝可实现相息图的白光再现的结论. 同时提出了对计算机制彩虹全息图进行空域复数滤波, 去除共轭像和零级的方法制作三维场景相息图. 实验中观察到了经过上述方法制作的相息图在白光下的再现像, 表明本文的理论分析是正确的, 提出的方法是可行的. 由于实验条件的限制, 目前彩虹相息图的衍射效率不高. 采用可精确控制位相的激光直写系统制作相息图, 提高其衍射效率是本课题组进一步研究的目标.

参考文献

- [1] YU Zu-liang, JIN Guo-fan. Computer generated hologram[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1984: 59-65.
虞祖良, 金国藩. 计算机制全息图[M]. 北京: 清华大学出版社, 1984: 59-65.
- [2] JIN Guo-fan, TAN Qiao-feng. Binary optics[J]. *Optoelectronic Technology and Information*, 2001, **14**(5): 1-10.
金国藩, 谭峭峰. 二元光学[J]. 光电子技术与信息, 2001, **14**(5): 1-10.
- [3] ZHANG Liang, SHI Yun-fei. Computer generated holography wavefront transforming element fabrication by binary optical techniqu[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1150-1152.
张良, 史云飞. 用二元光学技术制作计算全息波面变换元件[J]. 光学学报, 2001, **21**(9): 1150-1152.

- [4] HAN Liang-kai, MU Ren-wang, JI Xian-ming, *et al.* Two-channel kinoform by binary optical technique[J]. *Journal of Optoelectronic- s • Laser*, 2004, **15**(1): 33-36.
韩良恺, 沐仁旺, 纪宪明, 等. 用二元光学技术制作的双通道 Kinoform[J]. 光电子·激光, 2004, **15**(1): 33-36.
- [5] CAO Zhao-liang, HU Wu-sheng, HU Li-fa, *et al.* Application of the liquid crystal kinoform for optical testing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1941-1944.
曹召良, 胡五生, 胡立发, 等. 液晶相息图用于光学检测[J]. 光子学报, 2006, **35**(12): 1941-1944.
- [6] YANG Shi-yuan, HIROAKI TAKAJOH. Speckle reduction of kinoform reconstruction utilizing the 2π ambiguity of Image phase differences[J]. *Opt Rev*, 2005, **12**(2): 93-96.
- [7] YAMAGUCHI I, YAMAMOTO K, MILLS G A, *et al.* Image reconstruction only by phase data in phase-shifting digital holography[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(5): 975-983.
- [8] LI Yong, WANG Hui, JIN Hong-zhen. A new approach for making kinoform from hologram[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(10): 765-767.
李勇, 王辉, 金洪震. 一种由全息图制作相息图的方法[J]. 激光与红外, 2005, **35**(10): 765-767.
- [9] LI Yong, JIN Guo-fan, WANG Hui, *et al.* Research for horizontal parallax only kinoform in 3D display [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **B11**(6): 465-468.
- [10] SU Xian-yu, LI Ji-tao. Information optics[M]. Beijing: Science Press, 1999: 120.
苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 120.

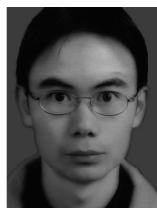
Study on Reconstruction of the Kinoform with White-light Illumination

XU Fu-yang, LI Yong, JIN Hong-zhen, WANG Hui

(*Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China*)

Abstract: The practicability of reconstructing the kinoform with white-light is discussed. It is drawn that the kinoform can be reconstructed with white-light, if a slit is placed between the kinoform and observer (called as rainbow kinoform). And a method for making rainbow kinoform is proposed. The computer-generated rainbow hologram is calculated. A finite impulse response (FIR) low-pass filter with real coefficients is designed according to the band-width of the object. The FIR band-pass filter with complex coefficient is gained by moving the spectrum of low-pass filter to the position where the spectrum of object is located. And the zero-order and conjugate image is eliminated by filtering the rainbow hologram with designed filter in spatial domain. The kinoform of 3D scenes is made by extracting the object phase distribution of the filtered hologram. In the experiments, the clear reconstructed image of rainbow kinoform is observed under white-light illumination. It is proved that the proposed approach is feasible.

Key words: Information optics; Kinoform; Reconstructed image with white light; Phase-mismatch



XU Fu-yang was born in 1981. Now he is a graduated student of Zhejiang Normal University, and his research interests focus on applying CGH to 3D display and opto-electronic information processing.