

文章编号:1004-4213(2011)09-1409-4

大尺寸物光波面彩色数字全息高质量重建研究

桂进斌, 李俊昌, 宋庆和, 楼宇丽

(昆明理工大学 理学院, 昆明 650093)

摘 要:为解决检测面尺寸较大时 CCD 难以得到高质量数字全息图的问题, 本文利用负透镜设计光学系统让 CCD 接收来自物体的缩小虚像, 以球面波为参考波, 使用单色 CCD 近距离得到三种色光照射下的大尺寸彩色物体的数字全息图, 然后采用可控放大率波面重建算法得到同一尺寸的数字全息重建像, 合成彩色数字全息重建像. 同时, 使用两种消零级方法去除零级干扰, 提高重建像质量, 一种方法利用空间光调制器相移技术在参考光中加入一次任意相移, 记录两幅数字全息图, 消除重建零级像; 另一种方法使用“无干扰全息图”消除重建零级像及共轭像. 本文讨论结果可为大物体彩色数字全息及多波长数字全息检测应用提供有益的参考.

关键词:彩色数字全息; 角谱衍射; 消零级; 空间光调制器

中图分类号: O438.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114009.1409

0 引言

随着计算机及 CCD 技术的进步, 用 CCD 代替全息感光板的彩色数字全息^[1-7]倍受关注. 同时, 提高数字全息图质量的方法也是目前关注的问题^[8-9]. 虽然, 彩色数字全息重建像质量目前还低于数码相机直接拍摄的彩色图, 但重建彩色图像的研究对于正确综合多波长数字全息检测信息具有重要意义. 彩色数字全息研究中, 用统一的放大率对不同色光的物光场进行重建是一个重要研究内容. 由于菲涅耳衍射积分的一次快速傅里叶变换重建图像的物理尺寸是光波长的函数^[1], 必须采用插值方法统一图像的尺寸^[2-3]. 为避免插值计算引入的额外误差, 人们对球面波为重建波的可控放大率波前重建方法进行了研究^[10]. 该方法首先从球面波照射下数字全息图透射光的频谱中获取物光频谱, 然后利用角谱衍射公式进行波前重建. 这种方法能较好地满足彩色数字全息研究的需要^[4-5]. 然而, 在实际应用中发现, 当重建球面波的波面半径较小时, 各级衍射波的频谱显著扩展而相互重叠, 在重建像上常形成强烈的零级衍射干扰. 为避免这种干扰, 不得不选择尺寸较小的滤波窗获取物光频谱^[4-5]. 其代价是损失了重建物光场的高频分量, 降低了重建图像的质量. 此外, 当物体投影尺寸大于 CCD 窗口尺寸时, 为能让物光频谱与零级衍射光频谱有效分离必须选择较大的记

录距离. 这样, 则极大地削弱了到达 CCD 物光的高频角谱分量, 重建图像质量不高. 而在彩色数字全息波面重建应用研究中, 尤其是大尺寸物体多波长数字全息检测研究中, 通常 CCD 尺寸远小于观测面的尺寸. 因此, 如何得到较高质量的数字全息图及重建场是需要解决的问题.

本文利用负透镜设计了让 CCD 接收来自物体的缩小虚像光波的光学系统, 使用较近的记录距离记录物体等效虚像的数字全息图以获得更多的高频信息. 视虚像光波为散射光波, 以球面波为参考光波, 根据角谱衍射的逆运算的快速计算公式, 实现了大尺寸物体的彩色图像重建. 同时, 为得到较好的效果, 本文对零级干扰进行了消除.

1 大尺寸物体物光波通过光学系统像面波面重建

图 1 是数字全息记录简化光路. CCD 记录的物

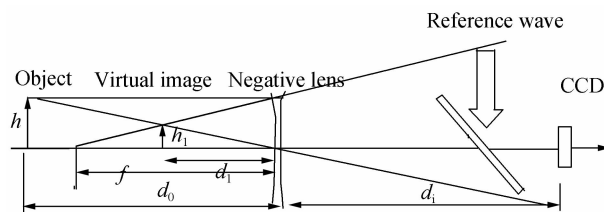


图 1 数字全息记录系统

Fig. 1 Digital hologram of the recorded system

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60977007)和昆明理工大学研究基金(No. KKZ3200907038)资助

第一作者: 桂进斌(1974-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为信息光学与数字图像处理. Email: jinbingui@163.com

导师(通讯作者): 李俊昌(1945-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为数字光信息处理. Email: jcli@vip.163.com

收稿日期: 2011-05-25; 修回日期: 2011-08-12

光可以视为来自物体虚像的光波. 令物体虚像到 CCD 的距离为 d , 物体高度为 h , 虚像高度为 h_1 , 由于

$$\frac{f}{h} = \frac{f-d_1}{h_1}, \frac{d_1}{h_1} = \frac{d_0}{h} \quad (1)$$

求解得

$$h_1 = \frac{fh}{f+d_0}, d_1 = \frac{fd_0}{f+d_0} \quad (2)$$

于是, 虚像放大率为

$$\frac{h_1}{h} = \frac{f}{f+d_0} < 1 \quad (3)$$

虚像到 CCD 的距离为

$$d = d_1 + d_i = \frac{fd_0}{f+d_0} + d_i \quad (4)$$

由于 $\frac{fd_0}{f+d_0} < d_0$, 因此, 在物体与 CCD 间插入负透镜后, 等效于让 CCD 记录一个距离较近, 尺寸较小的物体, 为完成较大尺寸物体的数字全息记录提供了一种有效的途径. 使用上述光路记录数字全息图后, 根据相关参量, 计算出等效重建距离, 就可重建物平面光波场.

2 消除零级干扰的讨论

在数字全息图重建研究中, 零级干扰对全息图重建像有很大的影响, 当使用可变放大率 D-FFT 计算公式重建物光场时, 由于零级干扰的原因, 通常要把滤波窗口选择得较小以避免零级, 但较小的滤波窗口将使得物光波的高频信息的损失, 从而严重影响重建像质量. 因此, 为获得较高质量的数字全息图, 应该对零级干扰进行抑制或消除, 一种方法是在参考光中引入任意相移, 拍摄两幅数字全息图, 利用相移前后两幅图像的差值图像来消除零级光的影响^[11].

设 $O(x, y)$, $R(x, y)$ 为到达 CCD 平面的物光波及参考光的复振幅, 全息图强度分布为

$$I(x, y) = |O|^2 + |R|^2 + O^*R + R^*O \quad (5)$$

若在参考光中引入一非 2π 整数倍的相移 δ , CCD 记录的第二幅全息图强度为

$$I'(x, y) = |O|^2 + |R|^2 + RO^* \exp(j\delta) + R^*O \exp(-j\delta) \quad (6)$$

式(5)和(6)相减后的差值图像为

$$I(x, y) - I'(x, y) = O^*R[1 - \exp(j\delta)] + R^*O[1 - \exp(-j\delta)] \quad (7)$$

其傅里叶变换为

$$\text{FFT}[I(x, y) - I'(x, y)] = \text{FFT}(O^*R)[1 - \exp(j\delta)] + \text{FFT}(R^*O)[1 - \exp(-j\delta)] \quad (8)$$

式(8)中已经不含有零级衍射光的频谱, 其余两

项与单幅全息图的频谱只分别差一个常量, 频谱在频率空间的位置与分布都没有其他变化, 因此, 可以选择较大半径的滤波器来获取共轭物光频谱, 利用可控放大率重建方法实现较好质量的波面重建^[12].

讨论表明, 引入相移时除相位外其余实验参量保持不变是实现消除零级衍射干扰的基本保证, 但在实际实验中当引入相移时难以保证参考光束其余参量不变. 为此, 可以利用液晶空间光调制器的相移功能, 有效避免引入相移时参考光的移动; 同时利用计算机控制相移及采用最小时间间隔记录相移前后的全息图, 最大限度保证系统参量在两次记录时不发生变化. 由于上述消除零级的方法需要记录两幅数字全息图, 对于实时检测的数字全息应用不是很方便, 文献[13]研究了球面波照射下全息图的频谱分布特性后, 提出使用“无干扰数字全息图”来进行可变放大率的波面重建, 也取得较好的消除零级效果, 在实验中使用两种方法对零级项进行了消除.

3 实验验证与结果讨论

实验中使用波长为 473 nm(蓝光)、532 nm(绿光)YAG 激光器及 632.8 nm(红光)He-Ne 激光器作为实验光源, 构成三组物光及参考光, 激光器的排列顺序分别红、蓝、绿. 如图 2, 红光被反射镜 M_0 反射后, 经过半反半透镜 M_1 与 M_2 后到达分束镜 BS_1 , 蓝光经过 M_1 与 M_2 后到达 BS_1 , 绿光经过 M_2 反射后到达 BS_1 . 每种波长的激光被分为两束, 一束照射物体表面形成散射光, 另一束经扩束后通过液晶空间光调制器 SLM, 再经过透镜 L_2 , 在透镜的焦平面上使用针空滤波器滤除其他级次, 只让正一级通过形成球面参考波. 液晶空间光调制器为 1.3 英寸 Sony TFTLCD, 像素尺寸为 $0.026 \text{ mm} \times 0.026 \text{ mm}$, 分辨率为 $1024 \times 768 \text{ pixel}$, 编码方式采用半色调编码方式^[14], 码元大小为 $8 \times 8 \text{ pixel}$. 采用分光记录的方式使用单色 CCD 依次记录三种色光的全息图, 采用遮挡的方式, 首先记录三种不同色光照明下全

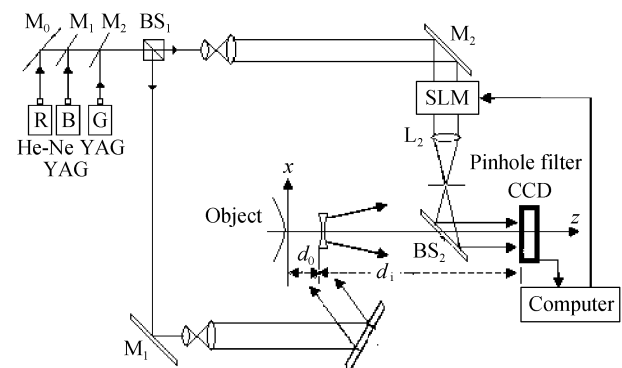


图 2 实验光路

Fig. 2 Experimental setup

息图,然后改变控制液晶空间光调制器的编码,使得参考光中产生相位的移动,再依次记录三种不同色光照射下的另一幅全息图.每一种色光都使用两幅全息图相减后的差值全息图,采用可控放大率波面重建算法,选择物体上同一点为不同色光照射下物光频谱中心参考点^[15],设计频谱滤波窗以容纳物光频谱,然后把物光频谱平移到中间位置,根据角谱衍射逆运算公式^[12],重建同一放大率的单色振幅像.根据 RGB 的三基色模型,用红、绿、蓝三种激光照射下重建的像作为彩色图像的 R、G、B 分量,合成真彩色图像.由于不同激光器功率不一样,实验中使用衰减器对光束功率进行调整.

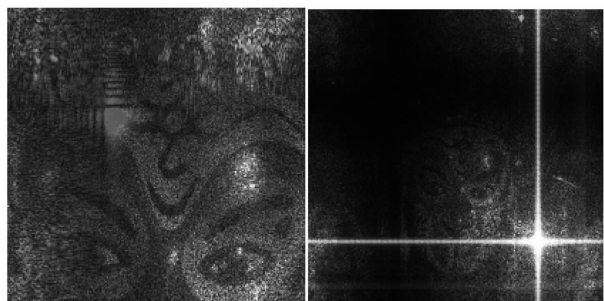
实验中,负透镜的焦距为 100 mm,物体表面到达负透镜表面的距离为 220 mm,负透镜到 CCD 表面的距离为 531 mm,根据上述参量计算像的等效记录距离为 600 mm,参考光波面半径为 655 mm. CCD 像素宽度 0.004 65 mm,有效像素 $1\ 024 \times 1\ 024$. 实验物体为大小约 105 mm \times 75 mm 的悟空头像,选择像的放大率 $M=0.15$. 图 3 显示了合成的彩色重建像,图 3(a)为未消零级的重建像,图 3(b)为消除部分零级干扰的重建像.为便于比较,本文拍摄了没有放置透镜的全息图,并得到重建结果,如图 4. 图 4(a)为记录距离 751 mm,放大率 $M=0.15$ 的重建结果,图 4(b)为记录距离 751 mm,放大率 $M=0.05$ 的重建结果.同样放大率的情况下,记



(a) Synthesized image with zero-order $M=0.15$ (b) Synthesized image with zero-order eliminated $M=0.15$

图 3 重建彩色图像

Fig. 3 Synthesized image from monochromatic images



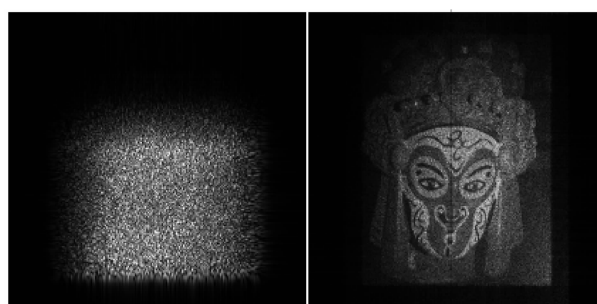
(a) $d=751\text{mm}$, $M=0.15$ (b) $d=751\text{mm}$, $M=0.05$

图 4 不使用透镜时重建结果

Fig. 4 Reconstruction images without lens

录距离 751 mm 只能得到局部的重建场.从结果中我们可看出,使用负透镜可以近距离记录大尺寸物体数字全息图,从而得到较多高频分量,提高重建图像的质量,并可根据不同物体的大小,使用不同焦距的透镜和参量来优化记录系统.同时,使用可控放大率的波面重建算法进行物光波面重建时,由于零级光频谱较宽,选择物光频谱时将不可避免包含较多零级衍射的频谱成份,从而对重建像造成了较大的干扰,使用计算机编码控制液晶进行相移消除零级后,将大幅改善成像质量,并可使像重建像占满整个图像空间,有利于对检测面细节进行分析.

在图 3 的结果中,由于实验时液晶的不稳定性,拍摄第二幅全息图时会产生干扰,使得零级不能完全消除.因此,在实验中保持液晶相移的稳定性是至关重要的.同时,为便于比较,本文使用得到“无干扰数字全息图”的方式,先得到没有零级与共轭像干扰的全息图^[13],然后再使用球面波照射,得到给定放大率的重建振幅强度图像,重建结果如图 5. 图 5(a)为绿光照射下的全息图得到的“无干扰全息图”频谱,(b)为由三色光全息图重建图像获得的彩色图.由图 5 中可看到,完全消除了零级干扰,得到较高质量的重建图像.



(a) Hologram spectrum of green (b) Synthesized image with $M=0.15$

图 5 无干扰全息图重建结果

Fig. 5 Reconstruction images without zero-order

4 结论

本文使用可控放大率的波面重建算法,让 CCD 接收来自负透镜成像系统的像光波,视像光波为散射光,以球面波为参考波,近距离记录了不同色光照射下彩色大物体的数字全息图,并使用可控放大率的重建方法重建统一尺寸的不同色光照射下单色数字全息图的振幅像,最后合成物体的彩色像.结果表明,使用负透镜成像能改善记录全息图的质量,同时还可方便地记录较大物体的高频信息.同时,文章使用两种的消零级方法,较好地消除零级干扰,获得高质量的彩色数字全息图重建像.本文研究结果为大物体和较大检测面的彩色数字全息及全息多波长检测应用提供有益的参考.

参考文献

- [1] ZHANG F, YAMAGUCHI I. Algorithm for reconstruction of digital holograms with adjustable magnification[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(14): 1668-1670.
- [2] DOMENICO A, GIUSEPPE C, SERGIO D N, *et al.* Method for superposing reconstructed images from digital holograms of the same object recorded at different distance and wavelength[J]. *Optics Communications*, 2006, **260**(1): 113-116.
- [3] ZHAO Jian-lin, JIANG Hong-zhen, DI Jiang-lei. Recording and reconstruction of a color holographic image by using digital lensless Fourier transform holography[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(4): 2514-2519.
- [4] PICART P, TAMKAN P, MOUZNER D, *et al.* Spatial bandwidth extended reconstruction for digital color Fresnel holograms[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(11): 9145-9156.
- [5] TAMKAN P, PICART P, MOUZNER D, *et al.* Method of digital holographic recording and reconstruction using a stacked color image sensor[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(3): 320-328.
- [6] LI Jun-chang, FAN Ze-bin. The study on the algorithm of the non-interpolation wave-front reconstruction of the color digital holography[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(4): 2457-2461.
李俊昌,樊则宾. 彩色数字全息的非插值波面重建算法研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(4): 2457-2461.
- [7] ZHANG Wei, LÜ Xiao-xu, YANG Feng-tao, *et al.* Multi-wavelength digital holography recorded by monochromatic CCD and color reconstructed image display[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2003-2007.
张维,吕晓旭,杨锋涛,等. 单色 CCD 记录多波长数字全息图及再现像彩色显示[J]. *光子学报*, 2007, **36**(11): 2003-2007.
- [8] GAO Zhi-qiang, LI Yong. Relationship of image quality of digital hologram and grey level adjustment[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 327-331.
高志强,李勇. 灰度调整与数字全息图像质的关系[J]. *光子学报*, 2011, **40**(3): 327-331.
- [9] MA Li-hong, WANG Hui, LI Yong, *et al.* Effect of system parameters on the reconstructed image quality in digital holographic microscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 300-306.
马丽红,王辉,李勇,等. 数字全息显微系统结构参量对再现像质的影响[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 300-306.
- [10] LI Jun-chang, TAMKAN P, PENG Zu-jie, *et al.* Digital holographic reconstruction of large objects using a convolution approach and adjustable magnification[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(5): 572-574.
- [11] ZHANG Yi-mo, LÜ Qie-ni, GE Bao-zhen. Elimination of zero-order diffraction in digital off-axis holography[J]. *Optics Communications*, 2004, **240**(4-6): 261-267.
- [12] 熊秉衡,李俊昌. 全息干涉计量[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [13] LI Jun-chang, FAN Ze-bin, TAMKAN P, *et al.* The study of color digital holography free from the zero-order diffraction interruption[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(3): 250-255.
李俊昌,樊则宾, TAMKAN P, 等. 无零级衍射干扰的彩色数字全息研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(3): 250-255.
- [14] WU Yan-mei, SONG Qing-he, LI Jun-chang. Study on encoding technique of phase-shifting unit based on LC-SLM[C]. *SPIE*, 2008. **6832**: T8320.
- [15] GUI Jin-bin, LI Jun-chang, LOU Yu-li, *et al.* Accurate overlapping of multi-wavelength object wave fields in color digital hologram reconstruction[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 897-901.
桂进斌,李俊昌,楼宇丽,等. 重建彩色数字全息图时不同色光物光场的准确重叠研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 897-901.

Color Digital Holographic High Quality Reconstruction of Large Size Object

GUI Jin-bin, LI Jun-chang, SONG Qing-he, LOU Yu-li

(School of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: In order to improve the quality of digital hologram of large size object, a method of recording large size object with a short distance is presented. With spherical wave as reference wave, the digital hologram of large size color object image, which is illuminated with differently wavelengths (red, green, blue), is recorded by using of optic system with negative lens. Then each monochromatic holographic image is reconstructed with the same magnification, and the corresponding digital color holographic image is acquired by accurately synthesizing the reconstructed monochromatic images. In order to improve quality of reconstruction image, two elimination zero-order methods are proposed. At first, the zero-order is eliminated with two recorded hologram, and SLM is used to change the record parameters. And the zero-order and conjugate images are eliminated by using “no disturb hologram” in another method. The result will provide a reference in holography application and digital holographic test of large size object.

Key words: Color digital holography; Angular spectrum; Zero-order elimination; Spatial Light Modulator (SLM)