

同步多路相移数字全息技术

张 静¹ 叶玉堂¹ 谢 煜¹ 刘娟秀¹ 刘 霖¹ 常永鑫^{1,2} 罗 颖¹

(¹ 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)
(² 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要 通过对相移数字全息技术的理论分析,提出了一种适用于动态三维物体成像的全新的同步多路相移全息方法。此方法通过在自由空间连续产生90°相位延迟的参考光束,与激光衍射透过物体后的光场进行干涉,利用四台相机构成的平衡探测器系统同时拍摄多帧干涉图像,根据菲涅耳衍射和傅里叶光学原理动态实时重现物体三维信息。模拟仿真和实验结果表明,该方法实现了单次相移数字全息技术,同步多路的采集可以用于动态物体的实时测量,大量同步多帧图像的获取提升了图像的质量。

关键词 全息;相移数字全息;物波重建;单次相移;同步多路;全息图

中图分类号 TB877.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1009002

Synchronous Multi-Channel Phase-Shifting Digital Holographic Technology

Zhang Jing¹ Ye Yutang¹ Xie Yu¹ Liu Juanxiu¹ Liu Lin¹
Chang Yongxin^{1,2} Luo Ying¹

(¹ School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)
(² Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract A new synchronous multi-channel phase-shifting holography, which is suitable for dynamic imaging of three-dimensional (3D) objects, is proposed by analyzing the theory of phase-shifting digital holography. The reference beam, which has continuous 90-degree phase delay on the free space, interferes with optical field of laser diffraction through object. Multi-frame holograms are taken by using the balanced detector system which is comprised of four cameras. The information of 3D object is reconstructed based on Fresnel and Fourier optical principles. Simulation and experimental results show that single-shot phase-shifting digital holography has been achieved, synchronous multi-channel can be used for real-time measurement of dynamic objects, a large number of simultaneous multi-frame images improve the quality of the image.

Key words holography; phase-shifting digital holography; wave-front reconstruction; single-shot phase shift; synchronous multi-channel; hologram

OCIS codes 090.1760; 090.1995

1 引 言

数字全息技术(PSDH)是20世纪90年代迅速发展起来的一种新型的全息成像技术,在形变测量、三维(3D)显示、三维物体识别和测量等领域得到广

泛应用。数字全息技术利用电荷耦合器件(CCD)代替传统的一次性全息材料来记录全息图像,并用计算机数值模拟光学衍射过程,从而再现原始物场的波前分布,实现全息的记录、存储、传输和再现全过

收稿日期: 2013-04-07; **收到修改稿日期**: 2013-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(61205004)、粤港招标关键领域重点突破项目(W0511159)

作者简介: 张 静(1984—),女,博士研究生,主要从事现代光电测控仪器、机器视觉、光电图像处理等方面的研究。

E-mail: zhangjing619@gmail.com

导师简介: 叶玉堂(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事集成光电子、红外传感器、微光光电传感器、激光微细加工、机器视觉系统和算法等方面的研究。E-mail: ytYe@uestc.edu.cn

程的数字化^[1]。由于再现图像光场复振幅分布是以数字形式直接描述的,因此数字全息可以进行定量测量分析。

目前,数字全息面临的最大问题是如何提高再现图像的分辨能力和实时性。

解决这一问题大多采用同轴相移技术,利用相移装置在参考光路中引入相移量,通过 CCD 记录多幅全息干涉图像,利用不同的重构算法对所记录的全息图像进行物体光波的重现,虽然一定程度上能消除共轭像和零级像,提高数字全息再现图像的分辨率,扩大再现图像的视场范围,但是,在相移量引入参考光的过程中,往往由于实际相移装置的不准确、实验操作误差、实验台振动等客观因素影响,难以实现记录的光束相位变化值与理论设计值的匹配^[2]。针对这类问题,大多文献提出重复相移、重复记录的平均法,或者寻找对相移误差敏感较小或能够补偿相移误差的算法来消除相移偏差,然而,这些方法相对计算量大,适用范围小,难以完全消除相移误差对再现图像的影响。由于相移操作次数越多可能造成的误差越大,因此,一次曝光获取全部相移数字全息技术有望在实验过程中引入较低的相移误差,真实地再现 3D 物体光场信息,颇受研究者的关注^[2-3]。

Zhang 等^[4-5]通过反射镜和压电设备实现相移,提高了再现图像质量,但序列式的移动引起了很大的噪声,该方法需要先后记录多幅全息图,无法用于实时图像的检测。Nomura 等^[6]利用泰曼干涉获得四幅相移干涉图,但装置比较复杂,对实验环境稳定性要求高。美国吐桑大学光学中心的 Wyant^[7]提出利用圆偏振光通过微加工制作线栅偏振阵列,一个 CCD 单步获取四幅相移干涉图。Awatsuji 等^[8-9]利用微加工获得的相位阵列实现了单步相移数字全息。以上两种获取单步相移的方法均存在光学元件精密加工的问题,并且需要利用差值法获取

不同相位的图像,降低了图像分辨率。钟丽云等^[10]结合相移技术与无透镜傅里叶数字全息技术,通过计算机控制压电陶瓷的驱动电路在参考光路中产生一个与记录前一幅数字全息图的参考光程差为 $\lambda/4$ 的微位移量,但 $\lambda/4$ 光路不能实现四步全息的实时性,无法用于动态物体的测量^[11]。

本文针对相移数字全息中的相位同步问题,研究光学设计的优化方案,解决相移连续改变和多路光学路径匹配问题,并利用图像处理技术解决四帧全息图像的亚像素级配准问题^[12],从而实时地再现 3D 物体光场信息。通过分析相移数字全息的理论,利用光学器件完成连续相位 90° 的改变,采用四台相机构成的平衡探测器系统,一次曝光完成四幅全息图像的记录。通过菲涅耳衍射原理和傅里叶光学原理,实时重构再现了三维物场的波前分布,解决了三维物体的实时数字全息成像问题。

2 相移数字全息理论

相移技术是使相干两波面中的一个波面的相位作连续变化,当相位变化某一特定值(2π 以内)对干涉场进行图像采集,得到全息图像。其主要优点是可实现再现光场有用信息与无用信息及噪声之间的分离,从而提高再现像的信噪比。本文以 90° 相移技术为例,分析相移数字全息技术的原理及特点^[5,13]。

2.1 全息记录和分析

对任意形式的数字全息记录光路,在干涉图样上的参考光和物光波阵面的一般表达式分别为

$$A_o(x, y) = a_o(x, y) \exp[i\phi_o(x, y)], \quad (1)$$

$$A_r(x, y) = a_r(x, y) \exp[i\phi_r(x, y) + \alpha], \quad (2)$$

式中 $A_o(x, y)$ 和 $A_r(x, y)$ 分别为物光和参考光的复振幅, $a_o(x, y)$ 和 $a_r(x, y)$ 分别为物光和参考光的幅值, $\phi_o(x, y)$ 和 $\phi_r(x, y)$ 分别为物光和参考光的相位, α 为参考光的相移。全息干涉图样为

$$I(x, y, \alpha) = a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) + 2a_o(x, y)a_r(x, y)\cos\{\phi_o(x, y) - [\phi_r(x, y) + \alpha]\}. \quad (3)$$

四步相移技术要求记录四幅不同的干涉图。在参考光束中引入连续的 $\pi/2$ 相位改变,参考光和物光干涉后,即可得到四幅全息图:

$$I(x, y, 0) = a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) + 2a_o(x, y)a_r(x, y)\cos[\phi_o(x, y) - \phi_r(x, y)], \quad (4)$$

$$I(x, y, \pi/2) = a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) + 2a_o(x, y)a_r(x, y)\cos[\phi_o(x, y) - \phi_r(x, y) + \pi/2], \quad (5)$$

$$I(x, y, \pi) = a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) + 2a_o(x, y)a_r(x, y)\cos[\phi_o(x, y) - \phi_r(x, y) + \pi], \quad (6)$$

$$I(x, y, 3\pi/2) = a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) + 2a_o(x, y)a_r(x, y)\cos[\phi_o(x, y) - \phi_r(x, y) + 3\pi/2]. \quad (7)$$

通过三角函数简化后,为

$$I(x, y, 0) = a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) + 2a_o(x, y)a_r(x, y)\cos[\phi_o(x, y) - \phi_r(x, y)], \quad (8)$$

$$I(x, y, \pi/2) = a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) - 2a_o(x, y)a_r(x, y)\sin[\phi_o(x, y) - \phi_r(x, y)], \quad (9)$$

$$I(x, y, \pi) = a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) - 2a_o(x, y)a_r(x, y)\cos[\phi_o(x, y) - \phi_r(x, y)], \quad (10)$$

$$I(x, y, 3\pi/2) = a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) + 2a_o(x, y)a_r(x, y)\sin[\phi_o(x, y) - \phi_r(x, y)]. \quad (11)$$

对(8)~(11)式进行代数计算, 直流分量 $a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y)$ 被消去, 利用四幅全息记录光波推导出的物体波阵面振幅和相位分别为

$$a_o(x, y) = [I(x, y, 3\pi/2) - I(x, y, \pi/2)]^2 + [I(x, y, 0) - I(x, y, \pi)]^2, \quad (12)$$

$$\varphi_o(x, y) = \arctan\left[\frac{I(x, y, 3\pi/2) - I(x, y, \pi/2)}{I(x, y, 0) - I(x, y, \pi)}\right]. \quad (13)$$

2.2 图像重构

随着计算机技术和信号处理技术的发展, 在数字全息图像中, 利用离散菲涅耳近似原理和傅里叶光学原理, 通过计算机仿真即可实现物体光波的重现, 如图 1 所示。在图 1 中, d 是重构平面和全息平面距离, $N_x \times N_y$ 是采样点数, $\delta\xi, \delta\eta$ 是采样间隔。在

菲涅耳近似原理中, 重构平面内像素大小是距离的函数, 这说明物体与记录全息图像的 CCD 距离增加时, 视场范围增大, 但是在重构过程中的采样点数目仍然保持不变, 菲涅耳函数和距离也不是单纯的倒数关系。利用离散菲涅耳变换推导出的重构公式为

$$\Gamma(m, n) = \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi d}{\lambda}\right) \exp\left[-i\pi\lambda d \left(\frac{m^2}{N_x^2 \delta\xi^2} + \frac{n^2}{N_y^2 \delta\eta^2}\right)\right] \sum_{k=0}^{N_x} \sum_{l=0}^{N_y} U(k, l) \times \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 N_x^2 + l^2 N_y^2)\right] \exp\left[i2\pi \left(\frac{km}{N_x} + \frac{ln}{N_y}\right)\right], \quad (14)$$

式中 $U(k, l)$ 为记录的光波信息。利用几何光学原理, 得到 x, y 方向的分辨率为

$$\Delta x = \lambda d / (N_x \delta\xi), \quad \Delta y = \lambda d / (N_y \delta\eta). \quad (15)$$

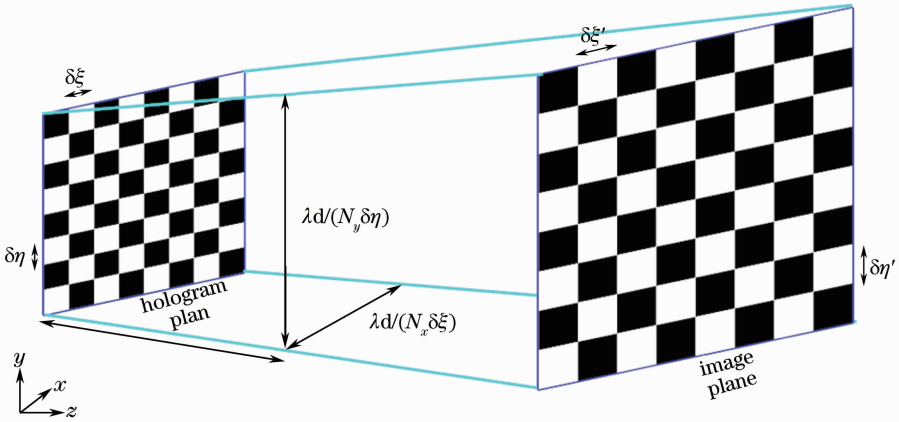


图 1 图像重建原理图

Fig. 1 Schematic of image reconstruction

通过以上的分析, 记录的波阵面信息可以在计算机中实时重构出物体光波信息。长距离传输中, 离散菲涅耳近似变换不需要对全息图进行补零^[14], 节省了计算机的资源, 缩减了运算时间。随着并行计算处理和数字信号处理的快速发展, 全息图像在软件上的实时重构推动了相移技术和实时三维全息的发展。

3 同步多路相移数字全息实现

传统相移数字全息实现方式只适合静态物体测量, 因为它需要在不同的时间内依次记录相移全息图像, 物光和参考光不同光路, 对于振动较为敏感, 所以在动态物体的测量上受到一定限制^[14]。本文所提出的实时三维相移数字全息成像方案如下所述。

同步多路相移数字全息实现方式如图 2 所示, 由 90° 自由空间光学混频和平衡的 CCD 阵列组成。

参考光波连续改变 $\pi/2$, 得到四张不同的干涉图样, 四台相机构成的平衡探测器同时记录光波阵面的两个正交积分量(实部和虚部)。对比数字全息技术, 同步多路相移数字全息四部相机通过硬件外部触发信号实现同步, 相机同时曝光并将信号通过采集卡

并行输入到计算机, 完成数字全息图像的记录, 并且移除了零级背景和共轭项, 信噪比增加了 3 dB。Kim 等^[15]曾提出 CCD 与波片组结合实现实时相移全息图的记录方法, 但本文所采用的光学器件较之更简单, 调节更方便。

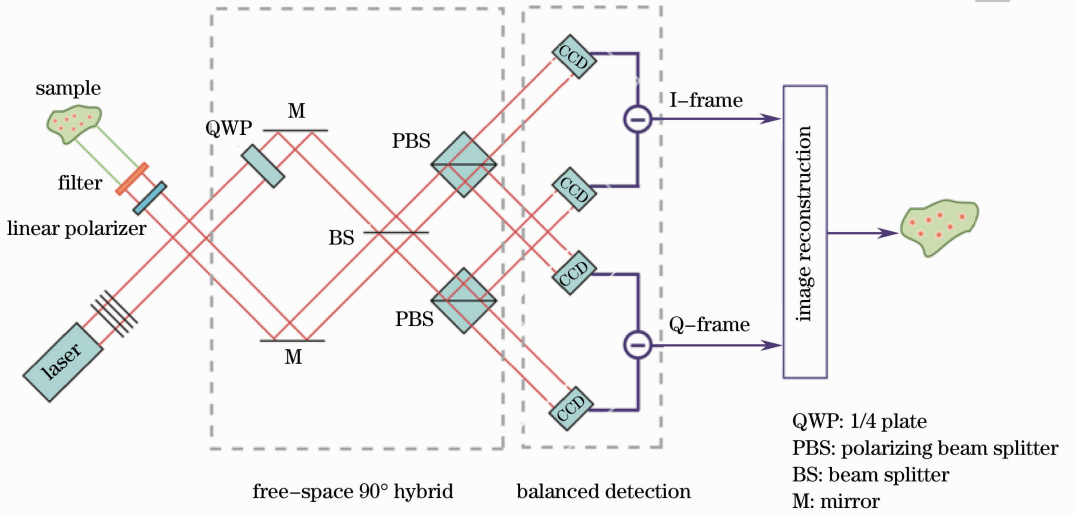


图 2 同步多路相移数字全息示意图

Fig. 2 Schematic of synchronous multi-channel phase-shifting digital holography

实验装置示意图如图 3 所示。激光器准直平行后发射出的偏振光作为相干光源。激光器前面的第一个偏振片 P 用来调节输入光束的功率以调节物光和参考光对比度。分束器 BS1 把激光束分成两路, 一路是参考光波, 另一路是物体光波。线性偏振器 P(0°) 确保参考光束是垂直偏振态, 物体光束偏振态相对于纸平面成 45° 角。分光镜 BS2 的输出可表示为

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_o \\ A_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_o + A_r \\ -A_o + A_r \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中 $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$ 是分光镜的散射矩阵。QWP 在参考光束内引入 90° 的相对相位延迟。两个 PBS 分离平行和水平分量, 形成四个相互具有 $\pi/2$ 相位差的干涉图。具体来说, 四个 CCD 的输出为

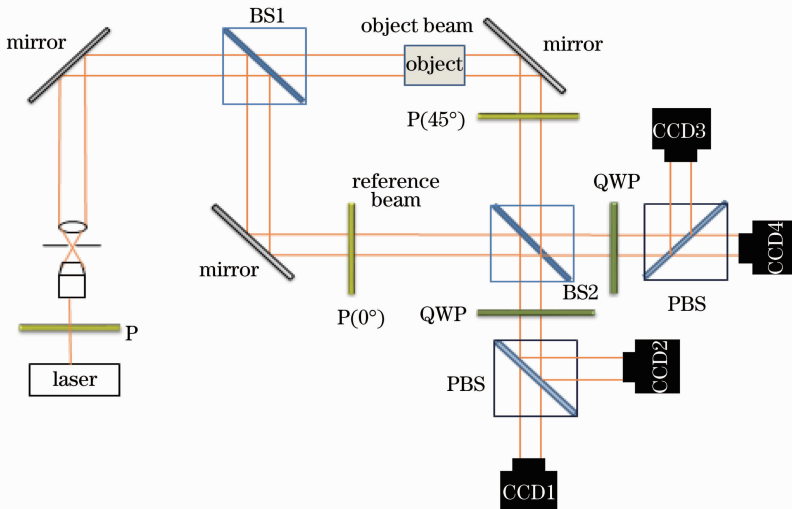


图 3 单次数字全息设置示意图

Fig. 3 Schematic of single-shot digital holography setup

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_o^{\parallel} + \mathbf{A}_r^{\parallel} \\ \mathbf{A}_o^{\perp} + j\mathbf{A}_r^{\perp} \\ -\mathbf{A}_o^{\parallel} + \mathbf{A}_r^{\parallel} \\ -\mathbf{A}_o^{\perp} + j\mathbf{A}_r^{\perp} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

式中 A_o^{\parallel} 和 A_o^{\perp} 分别代表物光平行和垂直分量, A_r^{\parallel} 和 A_r^{\perp} 分别代表参考光平行和垂直分量。

(8)~(11)式确切给出了四个 CCD 记录的光场强度。同步多路相移全息技术要求物体到四个

CCD 距离相同,误差在纳米量级内,利用白光干涉原理可以保证四路物体到 CCD 之间的光学距离误差在要求范围内。白光为多光谱光源,相干长度短,要求干涉路径长度必须匹配才能获得干涉条纹。实验利用白光沿四条光学路径在不同 CCD 表面反射回的光束两两干涉,图 4(a)~(c)记录了白光干涉的条纹。

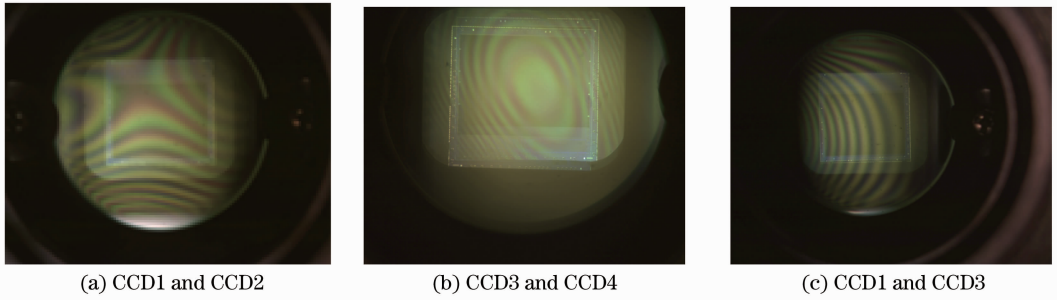


图 4 白光干涉条纹

Fig. 4 White light fringes

4 理论模拟和实验分析

4.1 针孔实验

为了验证同步多路数字全息的有效性和准确性,用 $50 \mu\text{m}$ 针孔作为测量物体进行实验。采用波长为 632.8 nm 的氦-氖激光器作为光源,四台同型号

CCD 通过外部触发器实现同步,相机像素大小为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,分辨率为 $5.3 \mu\text{m} \times 5.3 \mu\text{m}$,物体到 CCD 的距离均为 53.34 cm 。通过四相机同时记录两个小孔衍射图像,找到圆心坐标后对四张图像进行平移旋转,利用金字塔配准算法校准四台

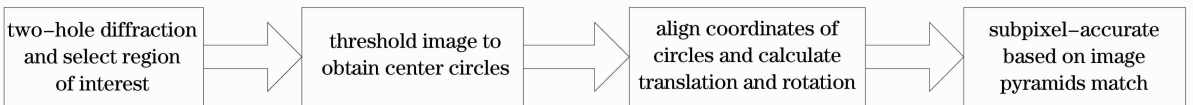


图 5 图像配准算法流程

Fig. 5 Image registration algorithm flow

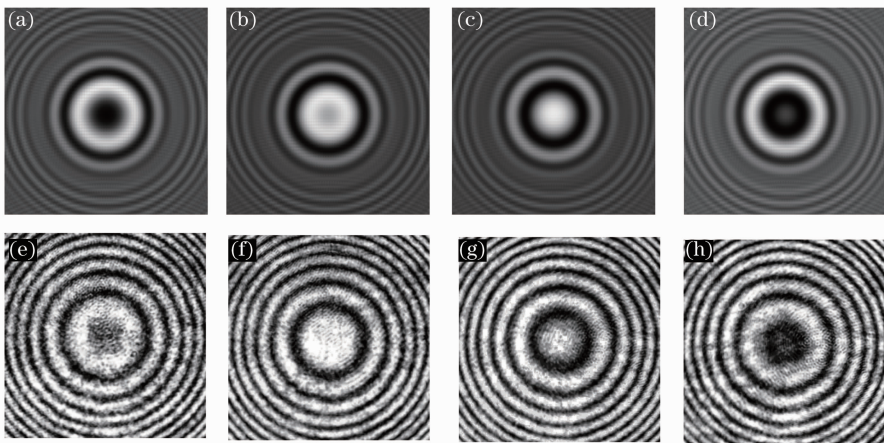


图 6 四步相移数字全息技术仿真和实验结果对比图。(a)~(d)仿真结果;(e)~(h)实验结果

Fig. 6 Simulation and experimental results of four step phase shifting digital holography contrast. (a)~(d) Simulation results; (e)~(h) experimental results

CCD 的干涉图样,使四幅图片的像素位置达到重合,配准精度达到亚像素标准,配准算法的流程图如图 5 所示,配准后的结果如图 6(e)~(h)所示。

利用相移数字全息理论中的(8)~(11)式,模拟实际光学距离下 CCD 接收到的干涉图样,如图 6(a)~(d)所示,与实验结果对比,结果显示同步多路数字全息的四幅干涉图像符合理论计算的干涉条纹。将 CCD 记录的全息图像代入(14)式得到物体相位分布对比图,如图 7 所示,由图 7(c)可知理

论模拟(实线)和实验(点线)得到的物体相位图匹配效果很好,说明同步多路数字全息产生的 $\pi/2$ 连续相位移动以及重构算法满足相移数字全息理论。图 8(a)为根据(12)、(13)式得到重构后的图像,图 8(b)给出了未使用相移数字全息,利用传统简单数字全息技术重构后的图像,对比两图可以看出,利用相移技术可以消除零级像和共轭像,提高结果图像的信噪比^[16]。

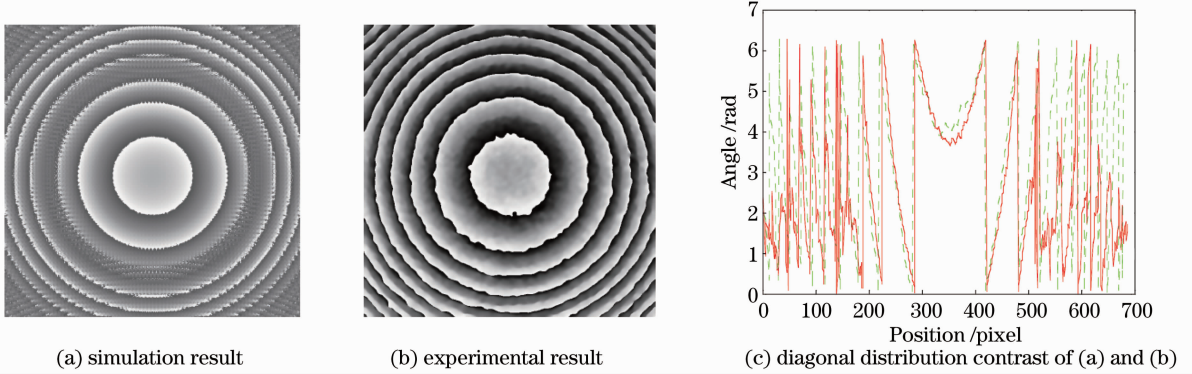


图 7 对象波阵面相位分布的仿真和实验结果

Fig. 7 Simulation and experimental results of object wavefront phase distribution

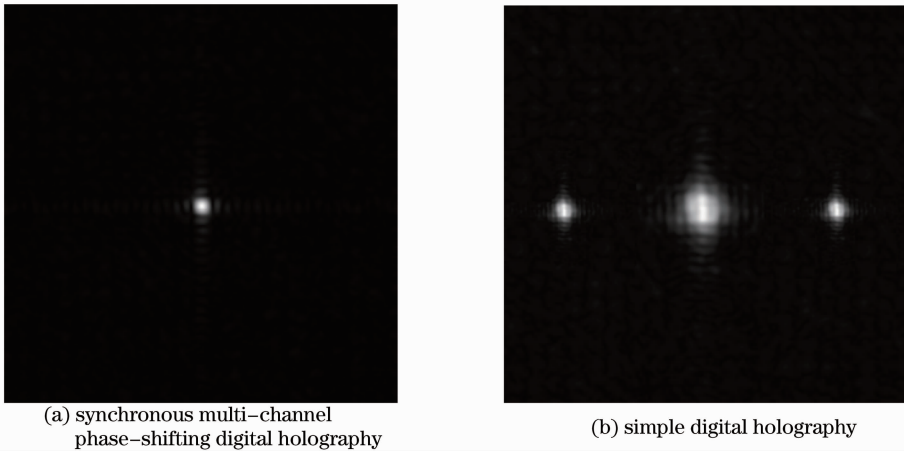


图 8 重构后的图像

Fig. 8 Reconstructed images

4.2 三维全息实验

数字全息常用于显微物体成像,为了提高系统的分辨率,在目标和 CCD 之间插入物镜,如图 9 所示,CL1 为柱透镜。实验中,为了增加数值孔径和

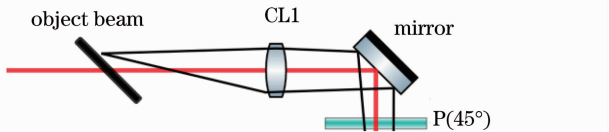


图 9 对象光束部分原理图

Fig. 9 Schematic of object beam part

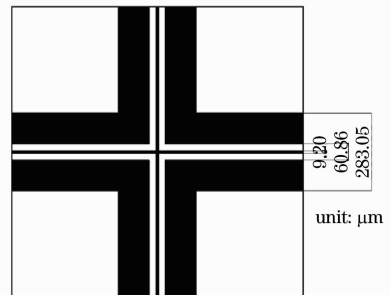


图 10 物体实际大小

Fig. 10 Actual size of object

轴向分辨率, 添加一个数码单反相机镜头(DSLR, 焦距为 135 mm)。本实验把一个立体的微小反光板作为 3D 对象, 它的实际尺寸如图 10 所示, 成像区域大小约为 0.8 mm, 倾斜 60° 放置。图 11 为不同距离下全息系统重构图像, 物体到 CCD 距离增大使物体左边线逐渐聚焦到右边线。本文采用自动聚

焦搜索的方法, 利用 Fibonacci 搜索算法和图像方差作为图像聚焦评价函数, 对图像进行分块, 绘制不同深度平面图像的合成全息图像, 再将所有不同位置处的全息图像进行叠加, 形成三维全息图像, 最终的 3D 重构图像如图 12 所示。

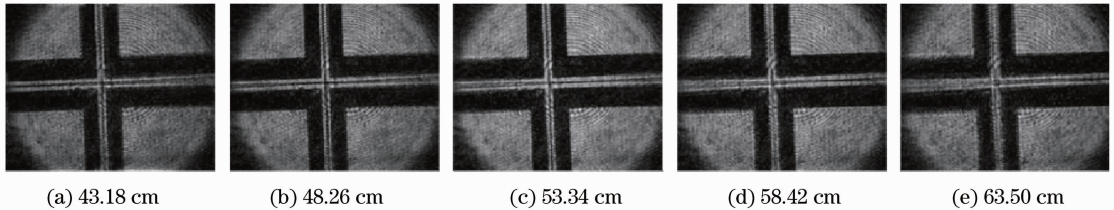


图 11 距离 CCD 平面不同间距的重构图像

Fig. 11 Reconstructed images at several distances from the CCD plane

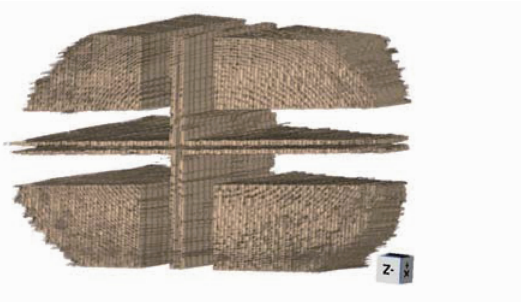


图 12 图像重建 3D 显示

Fig. 12 3D display of reconstructed image

5 结 论

提出了一种在自由空间下连续产生 90° 相位差的光路设计, 利用四台相机构成的平衡探测器同步记录四相移数字全息图, 实现了同步多路相移数字全息技术。数值模拟和实验结果证明, 同步多路数字全息重构图像清晰, 零级和共轭像被有效地去除, 能很好地实现物体波阵面再现, 有效提高重构图像的信噪比。相比于传统时间相移全息仅能研究静态物体的局限, 同步多路数字全息技术记录装置简单, 操作方便, 所有处理均由计算机完成, 可用于实时记录和表征物体动态变化特性, 实现物场的高清晰度重建和快速自动检测, 在微结构的形貌、形变测量以及生物细胞活体观测等领域将具有广阔的发展前景。

参 考 文 献

- 1 J W Goodman, R W Lawrence. Digital image formation from electronically detected holograms [J]. *Appl Phys Lett*, 1967, 11(3): 77-79.
- 2 K Jeong, J J Turek, D D Nolte. Fourier-domain digital holographic optical coherence imaging of living tissue [J]. *Appl Opt*, 2007, 22(46): 4999-5008.

- 3 D Huang, E A Swanson, C P Lin, *et al.*. Optical coherence tomography [J]. *Science*, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- 4 T Zhang, I Yamaguchi. Three-dimensional microscopy with phase-shifting digital holography [J]. *Opt Lett*, 1998, 23(15): 1221-1223.
- 5 I Yamaguchi, T Zhang. Phase-shifting digital holography [J]. *Appl Phys Lett*, 1997, 22(16): 1268-1270.
- 6 T Nomura, S Murata, E Nitani, *et al.*. Phase-shifting digital holography with a phase difference between orthogonal polarizations [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(20): 4873-4878.
- 7 J C Wyant. Computerized interferometric surface measurements [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(1): 1-8.
- 8 Y Awatsuji, M Sasada, T Kubota. Parallel quasi-phase-shifting digital holography [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(6): 1069-1071.
- 9 Y Awatsuji, A Fujii, T Kubota, *et al.*. Parallel three-step phase-shifting digital holography [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(13): 2995-3002.
- 10 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu, *et al.*. Analysis of some fundamental issue about digital hologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(4): 465-471.
- 钟丽云, 张以谟, 吕晓旭, 等. 数字全息中的一些基本问题分析 [J]. *光学学报*, 2004, 24(4): 465-471.
- 11 Guifang Li. Recent advances in coherent optical communication [J]. *Adv in Opt & Photon*, 2009, 1(2): 279-307.
- 12 Qiao Naosheng, Ye Yutang, Mo Chunhua, *et al.*. Study of capturing and preprocessing of printed circuit board photoelectric image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 75-78.
- 乔闹生, 叶玉堂, 莫春华, 等. 印刷电路板圆孔光电信号的获取与预处理研究 [J]. *光学学报*, 2010, 30(1): 75-78.
- 13 D C Chen, S M Jones, S S Olivier, *et al.*. High-resolution adaptive optics scanning laser ophthalmoscope with dual deformable mirrors [J]. *J Opt Soc Am A*, 2007, 24(5): 1305-1312.
- 14 T Colomb, E Cuche, F Charrière, *et al.*. Automatic procedure for aberration compensation in digital holographic microscopy and applications to specimen shape compensation [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(5): 851-863.
- 15 Soo-Gil Kim, Byoung-ho Lee, Eun-Soo Kim. Removal of bias and the conjugate image in incoherent on-axis triangular holography and real-time reconstruction of the complex hologram [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(20): 4784-4792.
- 16 Pan Weiqing, Lu Wei. Double wavelength one-shot in-line digital holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 352-358.
- 潘卫清, 鲁 伟. 基于双色光照明的单曝光同轴数字全息技术 [J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 352-358.

栏目编辑: 何卓铭