

Stokes 参量数字全息法实现相位物体成像

陈飞虎¹ 唐志列^{1,2} 陈 萍¹ 王 娟¹ 付晓娣¹

(¹ 华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510006
² 华南师范大学广东省高等学校量子信息技术重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要 为实现对相位物体的无损检测和成像, 克服数字同轴全息相位物体成像技术在消除零级像和孪生像的干扰时存在的系列问题, 提出一种基于 Stokes 参量的新的数字同轴全息技术。该方法区别于传统的利用干涉光场来记录原始像项的数字全息方法, 通过测量物参光合成光束的 Stokes 参量来分别得到这两束光的振幅和相位差, 从而准确、唯一地获得原始像项; 再利用数字再现即可重构物光的振幅和相位信息。实验中对弱吸收的相位样品进行了测量, 得到样品清晰的振幅和相位分布。结果表明, 采用该方法对相位物体进行数字全息再现, 可以克服传统同轴全息图中零级像和共轭像对相位物体信息的严重干扰, 对于提取相位物体的振幅和相位信息是可行和有效的。

关键词 全息; 无损检测; Stokes 参量; 相位物体

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0709001

Imaging Phase Objects by Digital Holography with Stokes Parameters

Chen Feihu¹ Tang Zhilie^{1,2} Chen Ping¹ Wang Juan¹ Fu Xiaodi¹

(¹ School of Physics and Telecom Engineering, South China Normal University,
Guangzhou, Guangdong 510006, China
² Laboratory of Quantum Information Technology, South China Normal University,
Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract In order to achieve nondestructive testing and imaging of phase objects, and overcome the problems existing in eliminating the interference of zero-order diffraction and conjugate image in phase objects imaging technology by in-line digital holography, a new digital holography method with polarization detection is proposed. Two beams, a reference wave with a horizontal polarization state and an object wave with a vertical polarization state, are synthesized. Using polarization detection method to measure the Stokes parameters of synthesized beam, amplitude and phase difference information of these two beams is obtained. Then a virtual image which contains the information of object beam is constructed. The amplitude and phase information of the object is obtained without removing the zero-order and conjugate image components. In the experiments, a phase object with weak absorption is measured and clean reconstructed images are achieved, including the distributions of amplitude and phase. It is shown that the serious interference of the noise in conventional hologram, the zero-order diffraction and conjugate image can be overcome by applying this algorithm, and it is feasible and effective to extract amplitude and phase information of phase objects.

Key words holography; nondestructive testing; Stokes parameters; phase object

OCIS codes 090.1995; 260.5430; 110.3175; 120.5050

1 引 言

相位物体的观察和成像方法如染色法^[1]、纹影

法^[2]、相衬法^[3,4]在生物观察、医学影像和工业生产等各个领域发挥着重要作用。由于相位物体具有高

收稿日期: 2012-01-16; **收到修改稿日期**: 2012-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(61178086)资助课题。

作者简介: 陈飞虎(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事偏振态测量技术方面的研究。E-mail: fehoxisi@126.com

导师简介: 唐志列(1963—), 男, 教授, 主要从事光声成像和共焦显微成像技术等方面的研究。

E-mail: tangzhl@scnu.edu.cn(通信联系人)

透明、低散射等特点,普通成像技术难以对其成像,相位物体的观察和成像研究一直是光学成像领域的重要课题之一。数字全息^[5~7]的出现为相位物体的成像研究提供了一种新的技术方法,利用数字全息技术来实现相位物体的成像^[8~11],具有灵敏度高、响应速度快、可记录物体的相位信息以及对物体的信息进行量化分析等优势,现已成为获得相位物体内部信息的一种重要方法。

利用数字全息来实现相位物体成像,有同轴和离轴两种方式。同轴全息相比离轴全息采样更充分、可扩大对物体高频信息的记录、可记录较大尺寸和较近距离的物体,有利于提高再现像的分辨率和清晰度。但采用数字同轴全息,不可避免地要考虑零级像、共轭像和原始像严重重叠的问题。基于相位物体弱吸收的特点,物光中仅相位分布携带有物体的信息,因此,调制到全息图中的物体信息也相对较少。在再现过程中,这部分信息更容易被零级像和共轭像所淹没,导致相位物体再现像清晰度降低,从而对全息图中零级像和共轭像的消除提出了更高的要求和挑战。但是从目前普遍采用的消除零级像和共轭像的方法来看,频谱滤波法^[12,13]需根据不同的实验条件频繁改变参量,且容易造成一些有用信息的丢失,影响再现像分辨率的提高;相移技术^[14,15]依赖于记录的四幅全息图的准确性,容易造成消除零级像和共轭像不完全的结果;图像相减法只能消除零级衍射像,在同轴全息中原始像仍然受到共轭像的严重干扰。上述问题的存在,在于这些方法的提出均以干涉的全息图出发点,针对全息图中同时存在的零级像项、共轭像项和原始像项,通过消除两个干扰项最终获得原始像项。在消除干扰项的过程中,容易造成“干扰信息”消除不完全或“有用信息”部分丢失等问题。

本文提出的基于 Stokes 参量的数字全息技术,与传统的数字全息利用干涉的方法记录全息图,再从全息图中提取原始像项不同。该技术先通过测量物光和参考光合成光束的 Stokes 参量,获得这两束光的振幅和相位差信息;然后根据原始像项的表达式,利用这些信息直接构造出原始像项;再利用数字模拟衍射过程实现物光原始像项的再现。采用该方法可直接获得原始像项,不涉及零级像和共轭像的任何信息,解决了传统数字全息中零级像和共轭像对原始像的干扰问题,有利于再现像成像质量的提高。这种方法可同时适用于同轴全息和离轴全息,系统简单灵活。该方法主要用于透明的弱吸收的相

位物体的成像,如果应用到细胞等生物标本的测量、成像领域,将会有一定的研究意义。

2 实验原理

传统的数字全息技术,通过拍摄全息图,记录物光和参考光的干涉光场,目的在于利用干涉的方法将物光的振幅和相位信息同时记录下来。全息图光强的分布为

$$I_H(x,y) = |U_O(x,y)|^2 + |U_R(x,y)|^2 + U_O(x,y)U_R^*(x,y) + U_O^*(x,y)U_R(x,y), \quad (1)$$

式中 $U_O(x,y)$ 和 $U_R(x,y)$ 分别表示物光和参考光在 CCD 记录面处的复振幅分布。由(1)式可以看出,通过物光和参考光的干涉,物光的复振幅信息已调制到原始像项 $U_O(x,y)U_R^*(x,y)$ 中,通过对原始像项的数字再现,便可重构物光的复振幅信息。

但是,这种方法的缺陷在于,记录全息图时,不但记录了包含物光原始信息的原始像项,同时也记录了零级像项和共轭像项,这两个项与原始像项同时存在,在再现时将原始像造成严重干扰。为了实现原始像项的准确再现,在传统数字全息中,提出了四步相移法、空间滤波法、图像相减法等,其目的均在于消除零级像项和共轭像项,从而最终获得原始像项。但是在这些过程中,容易对于干扰项消除不彻底,影响原始像项的提取,不能准确复原原始像信息。

由(1)式可知,原始像项 $U_O(x,y)U_R^*(x,y)$ 表示物光复振幅和参考光复振幅的共轭的乘积,这一项可以通过干涉的方法获得,但是干涉并不是获得两束光复振幅乘积的唯一方法。将原始像项的表达式展开为

$$U_O(x,y)U_R^*(x,y) = A_O(x,y)A_R(x,y) \times \exp[i[\phi_O(x,y) - \phi_R(x,y)]], \quad (2)$$

式中 $A_O(x,y)$ 和 $A_R(x,y)$ 表示物光和参考光在此处的振幅分布, $\phi_O(x,y)$ 和 $\phi_R(x,y)$ 为物光和参考光的相位分布。由(2)式可以发现,只要分别测量物光和参考光的振幅以及它们之间的相位差这三个物理量,就可以准确地获得原始像项,并且不会出现干涉全息中存在干扰项的问题。

由此提出一种基于 Stokes 参量的数字全息法,不是通过干涉的方法记录全息图来获得原始像项,而是通过测量 Stokes 参量,分别获得物光和参考光的振幅和两束光的相位差,再利用(2)式构造出原始像项。

实验中,产生两束振动方向相互垂直的线偏振

平面波 O 和 R, 其中 O 为经过待测相位物体的垂直线偏振平面物光波, R 为水平线偏振平面参考光波, 这两束光的复振幅可表示为

$$U_O(x, y) = A_O(x, y) \exp[i\phi_O(x, y)], \quad (3)$$

$$U_R(x, y) = A_R(x, y) \exp[i\phi_R(x, y)], \quad (4)$$

则它们的合成光束的 Stokes 参量可表示为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0(x, y) \\ S_1(x, y) \\ S_2(x, y) \\ S_3(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_O^2(x, y) + A_R^2(x, y) \\ A_R^2(x, y) - A_O^2(x, y) \\ 2A_R(x, y)A_O(x, y) \cos \phi(x, y) \\ 2A_R(x, y)A_O(x, y) \sin \phi(x, y) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $\phi(x, y) = \phi_O(x, y) - \phi_R(x, y)$ 表示这两束光的相位差。

对于合成光束 Stokes 参量的测量, 采用单光路测量系统, 在合成光波传播路径上依次放上一个可调偏振片和一个 1/4 波片, 通过调节偏振片和 1/4 波片的角度获得 X、Y、±45° 线偏振光以及右旋和左旋圆偏振光的光强 I_X 、 I_Y 、 I_{+45° 、 I_{-45° 、 I_r 和 I_l , 则用强度可表示合成光束的 Stokes 参量^[16]

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_X + I_Y \\ I_X - I_Y \\ I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ I_r - I_l \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由合成光束的 Stokes 参量, 便可获得光束 O 和 R 的振幅和相位差信息:

$$\begin{cases} A_O(x, y) = \sqrt{I_Y} \\ A_R(x, y) = \sqrt{I_X} \\ \phi(x, y) = \arctan(S_3/S_2) \end{cases}. \quad (7)$$

由此, 通过实验测量 Stokes 参量的方法, 获得了两束线偏振平面波的振幅和相位差信息, 也就获得了构造(2)式中的原始像项所需的全部物理量信息。

将(7)式代入(2)式中, 便可以准确获得原始像项信息。

获得原始像项 $U_O(x, y)U_R^*(x, y)$ 后, 利用计算机模拟衍射过程即可实现数字全息的再现。在数字全息的再现过程中, 将获得的原始像项以数字的形式存储到计算机中, 重建时用虚拟的平面波 $U_C(x, y)$ 照明全息图, 再通过卷积算法, 以数值计算的方式重建出再现像。

令照明光波 $U_C(x, y) = U_R(x, y)$, 原始像项 $U_H(x, y) = U_O(x, y)U_R^*(x, y)$, 根据数字全息再现原理, 在再现像面上的衍射光场为

$$U'_O(x', y') = \frac{\exp(ikz_0)}{i\lambda z_0} \iint_{\Sigma} U_C(x, y)U_H(x, y) \times \exp\left\{\frac{ik}{2z_0}[(x' - x)^2 + (y' - y)^2]\right\} dx dy = [U_C(x, y)U_H(x, y)] \otimes h(x, y), \quad (8)$$

式中 $h(x, y) = \frac{\exp(ikz_0)}{i\lambda z_0} \exp\left[\frac{ik}{2z_0}(x^2 + y^2)\right]$ 为卷积核, z_0 为再现距离, \otimes 为卷积符号, λ 为光波波长, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数。

因此, 再现像的光强分布 $I_O(x', y')$ 可表示为

$$I_O(x', y') = U'_O(x', y')U'^*_O(x', y'). \quad (9)$$

3 实验装置

Stokes 参量同轴数字全息法实现相位物体成像的实验装置采用基于马赫-曾德尔干涉仪的同轴全息实验光路, 如图 1 所示。由 He-Ne 激光器发出的光, 经过由显微镜镜头和凸透镜 L 组成的准直扩束系统后变成平面波, 再通过偏振器 P1 (P1 的作用是控制两分束光的光强比例), 被偏光分束镜 (PBS) 分成两束振动方向互相垂直的线偏振光, 其中水平线偏振光沿参考光路径, 垂直线偏振光沿物光路径。

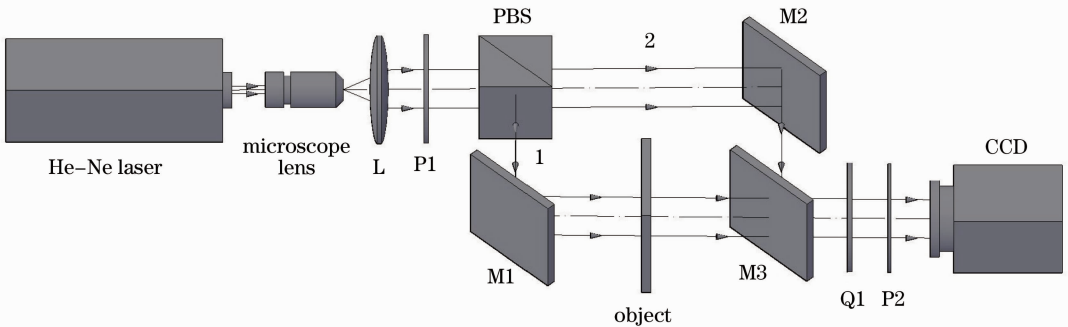


图 1 Stokes 参量数字全息法实现相位物体成像实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of imaging phase objects by digital holography with Stokes parameters

物光和参考光在半透半反镜 M3 上合成后,合成光束进入由 1/4 波片 Q1 和检偏器 P2 组成的 Stokes 参量测量系统并垂直入射到 CCD 表面,实现合成光束 Stokes 参量的测量。实验时,首先移开 1/4 波片 Q1,调节检偏器 P2 的角度分别为 0° 、 90° 、 45° 和 -45° ,由 CCD 分别摄得光强的二维分布图 I_x 、 I_y 、 I_{+45° 、 I_{-45° ;然后放上 1/4 波片 Q1,固定其快轴方向沿 X 轴方向,依次调节检偏器 P2 的角度为 45° 和 -45° ,由 CCD 摄得左圆和右圆偏振光强分布图 I_r 和 I_l ,将获得的全息图输入到计算机中进行量化存储即可编程再现。

实验所用激光器为波长 $\lambda=632.8\text{ nm}$,功率 $P=5\text{ mW}$ 的 He-Ne 激光器。CCD 为卸去镜头的加拿大 Lumenera 公司生产的 INFINITY2-1M 型相机,像素数为 $1392\text{ pixel}\times 1024\text{ pixel}$,像素尺寸为 $4.65\text{ }\mu\text{m}\times 4.65\text{ }\mu\text{m}$,有效接收面积 $6.473\text{ mm}\times 4.84\text{ mm}$ 。

4 实验结果及分析

实验所用的相位物体为在普通载玻片上用胶水书写的长 2.5 mm ,宽 2 mm 的字母“V”,该样品的厚度很薄,并且是透明的,可作为实验的弱吸收相位物体。

实验采用的物参光比为 $1:1$,实验中通过调节偏振片 P1 来控制物参光光强比。物平面到 CCD 全息面的记录距离 $z_0=20\text{ cm}$ 。利用 CCD 获取物参光的合成光束经过偏振检测系统后的 6 幅数字全息图 I_x 、 I_y 、 I_{+45° 、 I_{-45° 、 I_r 和 I_l ,将这 6 幅图像存储到计算机中,并用 Matlab 编程再现得到相应的实验结果。

图 2 为利用(6)式获得的物光和参考光的合成光束的 4 个 Stokes 参量的二维分布图,CCD 摄得图像像素数为 $1392\text{ pixel}\times 1024\text{ pixel}$,为了可以利用快速傅里叶变换来编程实现衍射再现,需保证图像采样点为 2 的整数次幂,因此,截取图像中心区域,像素数为 $1024\text{ pixel}\times 1024\text{ pixel}$,如图 2 所示。利用这 4 个 Stokes 参量,根据(7)式可获得物光和参考光的相位差 ϕ ,再利用计算机模拟数字衍射再现过程即可重构物体的原始像信息。

图 3 为相位物体的再现结果。图 3(a)为 CCD 紧贴样品后表面拍摄的图像,因为 CCD 离样品很近,处于衍射理论的几何衍射区内,可认为是物体的直接投影,用于与再现的结果做比较。图 3(b)和(c)分别为采用卷积法再现的物体的振幅和相位分布图,像素数为 $1024\text{ pixel}\times 1024\text{ pixel}$,由于再现过

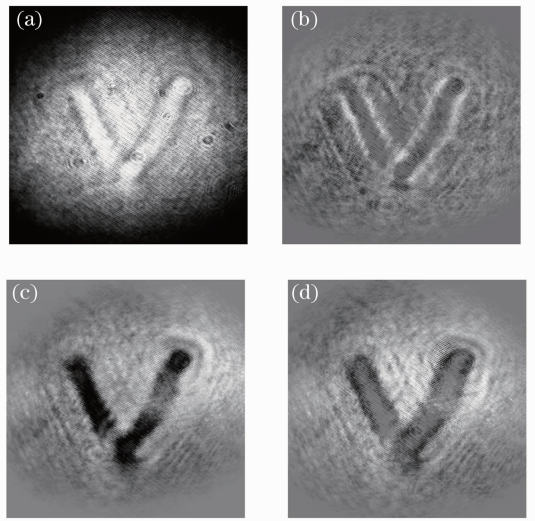


图 2 合成光束 Stokes 参量二维分布图。(a) S_0 二维分布图;(b) S_1 二维分布图;(c) S_2 二维分布图;(d) S_3 二维分布图

Fig. 2 Two-dimensional distribution of Stokes parameters of synthesized beam. (a) Two-dimensional distribution of S_0 ; (b) two-dimensional distribution of S_1 ; (c) two-dimensional distribution of S_2 ; (d) two-dimensional distribution of S_3 .

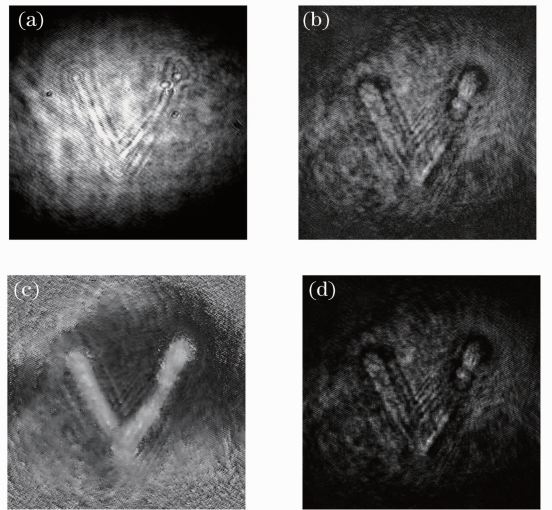


图 3 利用卷积法再现的相位物体结果。(a)紧贴样品拍摄的原物图;(b)物体振幅分布图;(c)物体相位分布图;(d)物体光强分布图

Fig. 3 Reconstructed image of phase object by means of convolution. (a) Object; (b) reconstructed amplitude distribution; (c) reconstructed phase distribution; (d) reconstructed intensity distribution

程采用卷积重构法,再现像平面和全息记录面具有相同的抽样间隔,再现像的像素尺寸等于 CCD 的像素大小,即 $\Delta x'=\Delta y'=4.65\text{ }\mu\text{m}$,因此,得到了与原始物体图 3(a)同样大小的再现像。图 3(d)为利用

(9)式获得的再现像的光强分布图。从实验结果可以发现,采用这种再现算法,再现结果中仅包含原始像信息,而没有零级衍射像和共轭像的干扰,对于肉眼很难分辨出来的弱吸收透明相位物体,可以较清晰地看到物体的振幅和相位分布。

图 4 为图 3(c)样品相位的三维显示图,像素数 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,由于样品的厚度 d 与物光通过样品引起的相位差,故图 4 中样品的相位分布也反映了该样品的厚度分布。由图 4 结果可以看出,字母“V”的相位整体是比较均匀的,这与制作样品时该样品的厚度较为均匀有关。而在字母“V”下方和右边区域均出现了相位的部分不均匀,这主要是书写字母时胶水的分布不均造成。由此也可以看出,实验得到的相位分布较好地显示了字母“V”的厚度分布情况,这在肉眼是很难清晰地观察到的。

为将该技术应用于细胞显微成像,采用像面全息技术^[17],在物光路径和参考光路径分别加入显微物镜(焦距为 f),如图 5 所示。经显微物镜放大后的实像成像在 CCD 记录面上,满足物像共轭关系

$$\frac{1}{z_0} + \frac{1}{z} = \frac{1}{f}, \quad (10)$$

则在 CCD 记录面上可以得到放大倍数为 $M = -z/z_0$ 的像。

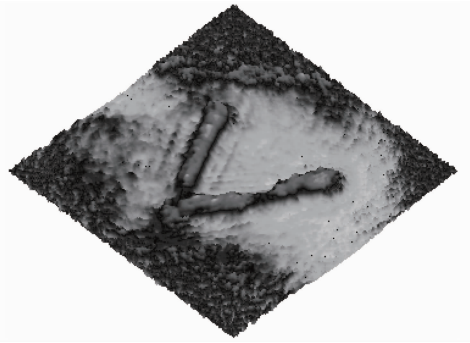


图 4 再现的相位物体相位分布的三维显示图
Fig. 4 Three-dimensional distribution of reconstructed phase of phase object

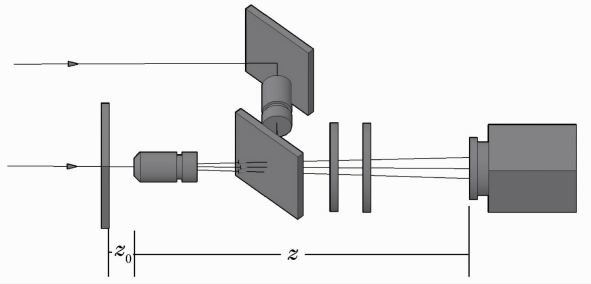


图 5 数字像面全息显微术装置图
Fig. 5 Setup of digital image-plane holographic microscopy

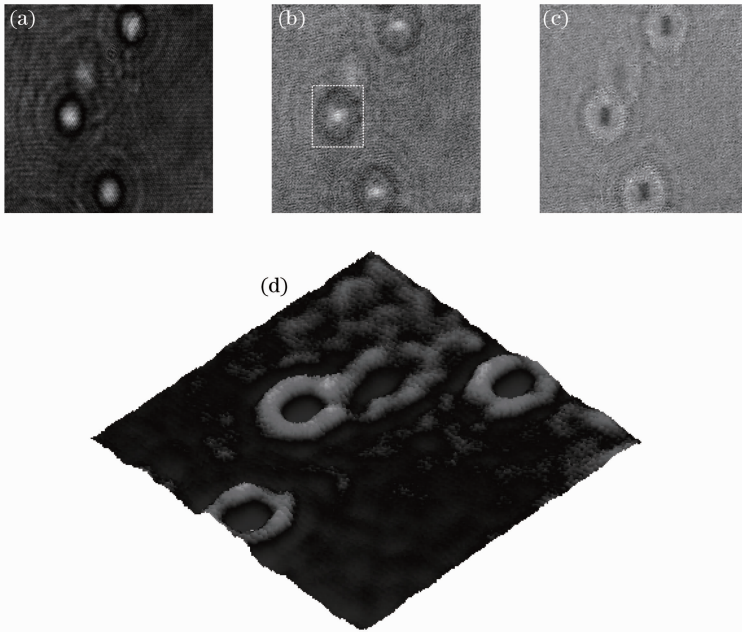


图 6 Stokes 参量数字全息法实现血红细胞成像结果。(a)血红细胞原放大图;(b)卷积法再现物体振幅分布图;
(c)卷积法再现物体相位分布图;(d)细胞相位分布的三维显示图

Fig. 6 Imaging red blood cells by digital holography with Stokes parameters. (a) Object; (b) reconstructed amplitude distribution by convolution; (c) reconstructed phase distribution by convolution; (d) three-dimensional distribution of reconstructed phase of red blood cells

实验记录的样品为直接涂在载玻片上的人体血红细胞, CCD 的参数与上述相位物体实验参数相同。显微物镜焦距为 8 mm, 样品细胞到 CCD 面距离为 890 mm, 利用物像关系, 该实验中显微物镜对样品的实际放大倍率为 109.6。

图 6 为将该技术应用用于细胞显微成像的实验结果。其中图 6(a) 是细胞在无参考光情况下摄得的 CCD 面上的实像, 由于采用像面显微全息技术, 该像即为物体经显微物镜放大后的实像, 可用于与再现结果做比较。图 6(b) 和 (c) 分别为采用卷积法再现的血红细胞样品的振幅和相位分布图, 像素数为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$, 截取图中一个细胞(白色框部分), 根据细胞所占像素数 $170 \text{ pixel} \times 240 \text{ pixel}$, 细胞视场大小为 $0.79 \text{ mm} \times 1.12 \text{ mm}$, 可得该细胞宽度为 $7.21 \mu\text{m}$, 与理论上人体血红细胞的大小 ($7 \sim 10 \mu\text{m}$) 相符, 且再现结果不受零级衍射像和共轭像的干扰, 细胞边缘清晰, 说明此方法可应用于细胞显微成像的研究。图 6(d) 为细胞相位的三维显示图, 图中细胞的立体结构清晰可见, 红细胞呈双凹圆盘状, 中间较薄, 边缘较厚, 没有细胞核。该实验所用的显微物镜理想分辨率为 $0.79 \mu\text{m}$, 另外, 根据 CCD 的像素大小和物镜的实际放大倍数, 可以知道 CCD 每个像素对应物体大小为 $0.65 \mu\text{m}$, 故该实验系统分辨率为 $0.79 \mu\text{m}$ 。如果选择放大倍数更大的显微物镜, 将能获得更高的分辨率。

5 结 论

将偏振检测技术引入数字全息中, 提出了一种利用数字全息实现相位物体无损检测的新方法。给出了该方法的理论分析, 并搭建了 Stokes 参量数字同轴全息系统, 实现了对弱吸收透明相位物体信息重构的实验。结果表明该方法可以实现相位物体的无损成像。该方法区别于传统数字全息, 不是用干涉的方法来记录原始像项, 而是通过偏振测量获得振动方向相互垂直的物光和参考光的振幅和相位差信息, 进而用数字的方式构造出一个包含物光信息的原始像项, 并实现该原始像项的再现, 从而克服了传统全息中零级像和共轭像的严重干扰, 有利于弱吸收透明相位物体信息的提取。与传统数字全息相比, 是一种新的尝试, 若与显微全息技术相结合, 可用于对透明的生物样本进行信息的提取, 对于生物样品的观测和研究是非常有意义的。

参 考 文 献

- 1 A. W. Lohmann. Optical Information Processing [M]. Yu Zuliang, Jin Guofan Transl.. Beijing: Tsinghua University Press, 1987. 284
罗曼. 光学信息处理[M]. 虞祖良, 金国藩译[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987. 284
- 2 J. H. Massig. Measurement of phase objects by simple means [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(19): 4103~4105
- 3 Zhao Jie, Wang Dayong, Li Yan *et al.*. Experimental study on the quantitative phase-contrast imaging of the biological samples by digital holographic microscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2906~2911
赵洁, 王大勇, 李艳等. 数字全息显微术应用于生物样品相衬成像的实验研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(11): 2906~2911
- 4 Pan Weiqing, Zhu Yongjian, Lang Haitao. Phase-contrast imaging technology with digital holographic microscope based system calibration [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1812~1820
潘卫清, 朱勇建, 郎海涛. 基于系统标定的相衬显微数字全息方法[J]. 中国激光, 2010, **37**(7): 1812~1820
- 5 U. Schnars. Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(7): 2011~2015
- 6 I. Yamaguchi, T. Zhang. Phase-shifting digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16): 1268~1270
- 7 T. Zhang, I. Yamaguchi. Three-dimensional microscopy with phase-shifting digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(15): 1221~1223
- 8 E. Cuche, F. Bevilacqua, C. Depeursinge. Digital holography for quantitative phase-contrast imaging[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(5): 291~293
- 9 E. Cuche, P. Marquet, C. Depeursinge. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(34): 6994~7001
- 10 C. J. Mann, L. Yu, C. M. Lo *et al.*. High-resolution quantitative phase-contrast microscopy by digital holography[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(22): 8693~8698
- 11 Qian Xiaofan, Zhang Lei, Dong Keping. Phase reconstruction of cells with microscopy digital holography based on phase shifting technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(10): 1565~1568
钱晓凡, 张磊, 董可平. 基于相移技术的显微数字全息重构细胞相位[J]. 光子学报, 2006, **35**(10): 1565~1568
- 12 Zhang Yaping, Zhang Jianqiang, Xu Wei *et al.*. Elimination of the influence of zero-order diffraction using high pass filter in wavefront reconstruction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1109002
张亚萍, 张建强, 许蔚等. 波前重建中的高通滤波消零级衍射干扰研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(11): 1109002
- 13 Liu Wenwen, Dai Yiquan, Kang Xin *et al.*. Zero-order image elimination in digital hologram based on finite impulse response filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 856~859
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
- 14 Wu Youpeng, Liu Xiangxuan, Wang Hongxia. Two-step phase-shifting iterative algorithm of improving quality of reconstructed image in digital holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2292~2295
吴友朋, 刘祥萱, 王红霞. 提高数字全息再现像像质的两步相移迭代算法[J]. 光学学报, 2008, **28**(12): 2292~2295
- 15 Lü Xiaoxu, Zhong Liyun, Zhang Yimo. Holographic reconstructing algorithm and its error analysis about phase-shifting phase measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1367~1371

- 吕晓旭, 钟丽云, 张以谟. 相移相位测量的全息再现算法及测量误差分析[J]. 光学学报, 2006, **26**(9): 1367~1371
- 16 H. G. Berry, G. Gabrielse, A. E. Livingston. Measurement of the Stokes parameters of light[J]. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(12): 3200~3205
- 17 Dong Keping, Qian Xiaofan, Zhang Lei *et al.*. Digital holography microscopy study for cells[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2013~2016
- 董可平, 钱晓凡, 张磊等. 数字全息显微术对细胞的研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(11): 2013~2016

栏目编辑: 何卓铭