

等曲率物光和参考光预放大数字全息显微术中的相位畸变补偿

王华英^{1,2} 刘飞飞¹ 宋修法² 廖 微¹ 于梦杰¹ 刘佐强¹

(¹河北工程大学信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038)

²河北工程大学理学院, 河北 邯郸 056038

摘要 为了快速、准确地再现球面参考光预放大数字全息图的三维信息,采用理论推导和实验验证相结合的方式,对等曲率物光和参考光预放大数字全息显微系统的相位畸变补偿问题进行了研究。推导了该系统的点扩展函数,进而获得了物体再现光场的复振幅及相位畸变表达式,利用估测的相位掩模对再现光场相位畸变预补偿后进行相位解包裹,结合自动相位补偿方法获得待测样品较为准确的相位分布。对人体血红细胞进行了实验研究,结果表明,利用相位掩模对再现光场进行预补偿,一方面可以避免相位解包裹的错误,另一方面还可以有效消除再现光场的二次相位畸变,以实现利用单次自动相位补偿方法获得光场正确的相位分布。

关键词 全息;预放大数字全息术;球面参考光;相位畸变补偿;血红细胞

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0209001

Phase Aberration Compensation in Pre-Magnification Digital Micro-Holography with Equal-Currature Object Beam and Reference Beam

Wang Huaying^{1,2} Liu Feifei¹ Song Xiufa² Liao Wei¹ Yu Mengjie¹ Liu Zuoqiang¹

(¹School of Information and Electronic Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

²College of Science, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China

Abstract In order to fastly and accurately reconstruct the three-dimensional information of the hologram recorded by pre-magnification digital micro-holography, the solution of phase compensation in pre-magnification digital micro-holography with equal-currature object beam and reference beam is studied theoretically and experimentally. The point spread function is derived, then the expression of reconstructed light field amplitude and phase aberration are obtained, and by using phase mask to pre-compensate with the phase aberration fastly, the phase for the reconstructed light field is unwrapped. At last, combined with automatic phase compensation, the accurate phase distribution of the sample is obtained. The red blood cells are researched experimentally. The result shows that phase mask to pre-compensate, not only can avoid the error in phase unwrapped, but also effectively eliminate the secondary phase distortion in the reproduction of light field, which aims to achieve the right phase distribution using single automatic phase compensation method.

Key words holography; pre-magnification digital holography; spherical reference wave; phase aberration compensation; red blood cells

OCIS codes 090.1000; 090.1995; 180.6900

1 引 言

数字全息术是一种新型的三维(3-D)成像与测

量技术,高度融合光学、光电技术及计算机技术。该技术用光电传感器件 CCD(或 CMOS)记录数字全

收稿日期: 2012-09-03; **收到修改稿日期**: 2012-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(61077001,61144005)、河北省自然科学基金(F2010001038,F2012402051,F2012402028)、河北省科技支撑计划(09277101D)和河北省教育厅科学技术研究重点项目(ZH2011241)资助课题。

作者简介: 王华英(1963—),女,博士,教授,主要从事光学信息处理及数字全息技术等方面的研究。

E-mail: pbxsiyngzi@126.com

息图,并利用计算机来模拟光学衍射成像过程,实现了记录、存储和再现全过程的数字化,从而可以灵活、方便地进行滤波、畸变补偿、叠加、传输和显示等操作,数字全息术的这些优势使之受到了广泛的应用^[1,2]。

数字全息显微成像与测量技术是数字全息术最重要应用之一,其无损、快速、高分辨、高灵敏、三维可视化定量成像及灵活的数字化处理等优点,使其成为众多学者关注的热点^[1~9]。数字全息显微成像最为常见的光路是平面参考光预放大离轴记录光路^[1],该光路可以有效解决数字全息中因记录元件光敏面小且空间分辨率低而引起的再现像分辨率低的问题,但不能充分利用记录器件的有限带宽^[4,6]。球面参考光数字全息显微术可以有效地利用记录器件的有限空间带宽^[7],在此基础上,通过精调物光和参考光中显微物镜的位置,使两束光呈等波面弯曲,从而实现等曲率物光和参考光预放大数字全息显微术。利用该技术可以最大限度地利用记录器件的带宽。预放大数字全息再现光场存在二次及一次相位畸变,这种畸变会引起很大的相位梯度,使包裹相位图产生欠采样现象,对这样的包裹相位图进行解包裹往往会产生错误^[3]。因此,对等曲率物光和参考光预放大数字全息显微中的相位畸变进行推导与分析,并研究其补偿方法,对快速、准确地还原出物体真实的相位分布有重要的实际意义。

2 点扩展函数理论

图 1 为等曲率物光和参考光预放大数字全息显微记录光路示意图。由 He-Ne 激光器发出的波长为 632.8 nm 的激光经偏振分束镜(PBS)后分为两束,并分别经扩束-滤波-准直系统,形成两束较粗的光束,一束形成照明样品的平面光波,并经显微物镜 MO₁ 后形成放大的物光波,另一束经显微物镜 MO₂ 后形成发散球面光波作为参考光波,两束光经棱镜(BS)合束并发生干涉,干涉条纹被位于样品后面的 CCD 传感器所记录,随后送往计算机进行处理。实验中微调参考光路中显微物镜的位置,使在物光路中不放物体时全息图的干涉条纹呈平行等间距的直条纹分布,从而确保物光和参考光等波面弯曲。

图 2 即为等曲率物光和参考光预放大数字全息显微成像系统的坐标示意图。其中,显微物镜已用单透镜等效表示,物平面、MO₁ 平面、CCD 平面及

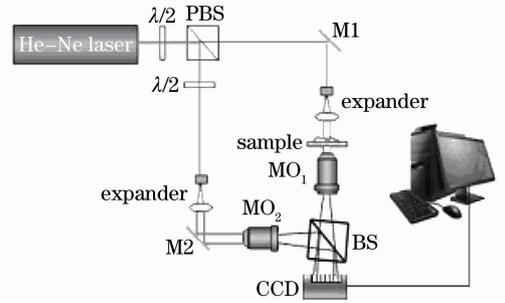


图 1 等曲率物光和参考光预放大数字全息显微记录光路示意图

Fig. 1 Schematic for recording pre-magnification digital micro-holography with equal-curvature object beam and reference beam

MO₂ 的成像平面分别用 (x_0, y_0) 、 (x_ϕ, y_ϕ) 、 (x, y) 及 (x_i, y_i) 表示(图中 y_0, y_ϕ, y 及 y_i 4 个坐标轴未画出), z 轴沿系统的光轴方向并通过以上 4 个平面的中心, d_0, f 和 d_i 分别为物平面到显微物镜的距离、显微物镜焦距和显微物镜到像平面的距离。 $\delta(x - x_r, y - y_r, -d_i + d + f)$ 表示球面参考点光源,其中 x_r, y_r 为参考光的偏置量,其在光轴上的投影点与 MO₁ 的焦点重合,从而保证了离轴等曲率物光和参考光预放大数字全息光路的记录要求。需要说明的是,图 2 中 MO₂ 与 MO₁ 的光轴之间夹角很小,通常为 $2^\circ \sim 3^\circ$ 。为了清晰起见,图中放大了这个夹角。

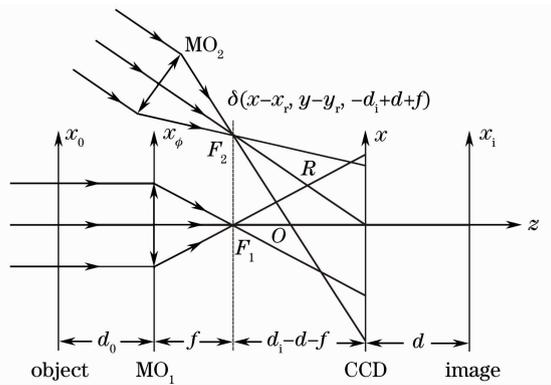


图 2 等曲率物光和参考光预放大数字全息显微记录坐标示意图

Fig. 2 Coordinate system for recording pre-magnification digital micro-holography with equal-curvature object beam and reference beam

为了表达上的简洁,将物体视为一点 $\delta(x_0 - \xi, y_0 - \eta)$, ξ, η 为物光的偏置量,根据菲涅耳衍射公式,忽略无关紧要的常数项因子,在不考虑 MO 及 CCD 的有限孔径影响的情况下,得到 CCD 平面的物光场复振幅分布为

$$O(x, y) = A \exp \left[\frac{jk}{2d_\phi} (x^2 + y^2) \right] \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[\frac{j\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_\phi} - \frac{1}{f} \right) (x_\phi^2 + y_\phi^2) \right] \times \\ \exp \left\{ -j2\pi \left[\left(\frac{\xi}{\lambda d_0} + \frac{x}{\lambda d_\phi} \right) x_\phi + \left(\frac{\eta}{\lambda d_0} + \frac{y}{\lambda d_\phi} \right) y_\phi \right] \right\} dx_\phi dy_\phi, \quad (1)$$

式中 k ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$) 为波数, λ 为照明光波的波长, $d_\phi = d_i - d$, A 为复常数。结合透镜成像公式, 经计算后得出

$$O(x, y) = B \exp \left[\frac{jk}{2d_0} \left(1 - \frac{d_\phi d_i}{dd_0} \right) (\xi^2 + \eta^2) \right] \exp \left[-\frac{jk}{2d} (x^2 + y^2) \right] \exp \left[-\frac{jk d_i}{dd_0} (\xi x + \eta y) \right], \quad (2)$$

式中 B 为复常数。

由于物光束与参考光束之间夹角很小, 因而可以近似认为参考光源在 CCD 平面形成的光波场振幅为常数, 且可将其复振幅表示为

$$R(x, y) = R_0 \exp \left\{ \frac{jk}{2d_r} [(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2] \right\} = R_0 \exp \left\{ \frac{jk}{2(d_i - d - f)} [(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2] \right\}. \quad (3)$$

式中 $d_r = d_i - d - f$, 表示参考光波到 CCD 光敏面的距离。

CCD 平面干涉条纹强度分布为

$$H(x, y) = |O + R|^2 = |O|^2 + |R|^2 + R^* O + O^* R, \quad (4)$$

式中 O, R 为位于 CCD 光敏面上的物光波和参考光波的复振幅表示, 第一、二项为零级像, 第三项是正一级像, 第四项为负一级像, 后两项均是物场重构中的有用信息, 一个是物场的原始像信息, 另一项则是物场的共轭像信息。

数字全息术的再现过程是利用计算机模拟光学衍射成像来实现的。根据全息原理及菲涅耳衍射公式, 重建的实原始像光场复振幅分布为

$$U_{+1}(x_i, y_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} C(x, y) R^*(x, y) O(x, y) \exp \left\{ \frac{jk}{2d} [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2] \right\} dx dy, \quad (5)$$

式中 $C(x, y)$ 为再现参考光波。为了使像光场能够清晰再现, 必须使积分号内包含 $(x^2 + y^2)$ 项前的系数为 0, 由此推得再现参考光波须满足

$$C(x, y) = \exp \left[\frac{jk}{2d_c} (x^2 + y^2) \right], \quad (6)$$

且式中 $d_c = d_r = d_i - d - f$ 。将(2)、(3)、(6)式代入(5)式, 可得

$$U_{+1}(x_i, y_i) = C \exp \left[\frac{jk}{2d_0} \left(1 - \frac{d_\phi d_i}{dd_0} \right) (\xi^2 + \eta^2) \right] \exp \left[\frac{jk}{2d} (x_i^2 + y_i^2) \right] \exp \left[\frac{jk}{2(d_i - d - f)} (x_r^2 + y_r^2) \right] \times \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left\{ -j2\pi \left[\left(\frac{d_i \xi}{\lambda d d_0} - \frac{x_r}{\lambda d_r} + \frac{x_i}{\lambda d} \right) x + \left(\frac{d_i \eta}{\lambda d d_0} - \frac{y_r}{\lambda d_r} + \frac{y_i}{\lambda d} \right) y \right] \right\} dx dy = \\ C \exp \left[\frac{jk}{2d_0} \left(1 - \frac{d_\phi d_i}{dd_0} \right) (\xi^2 + \eta^2) \right] \exp \left[\frac{jk}{2d} (x_i^2 + y_i^2) \right] \exp \left[\frac{jk}{2(d_i - d - f)} (x_r^2 + y_r^2) \right] \times \\ \delta \left(\frac{d_i \xi}{\lambda d d_0} - \frac{x_r}{\lambda d_r} + \frac{x_i}{\lambda d}, \frac{d_i \eta}{\lambda d d_0} - \frac{y_r}{\lambda d_r} + \frac{y_i}{\lambda d} \right), \quad (7)$$

式中 C 为复常数。经化简、整理后得到该系统的点扩展函数为

$$h(x_i, y_i; \xi, \eta) = \exp \left[\frac{jk}{2d_0} (\xi^2 + \eta^2) \right] \exp \left[\frac{j\pi}{\lambda d_i} (x_i^2 + y_i^2) \right] \exp \left[j2\pi \frac{d_\phi}{\lambda d_i (d_i - d - f)} (x_r x_i + y_r y_i) \right] \times \\ \delta \left[x_i - M\xi - \frac{d}{(d_i - d - f)} x_r, y_i - M\eta - \frac{d}{(d_i - d - f)} y_r \right], \quad (8)$$

式中 $M = -d_i/d_0$ 表示再现像的放大倍率。

3 相位畸变理论

根据线性不变系统理论, 对系统的点扩展函数进行叠加积分, 可求得实际物体 $O(\xi, \eta)$ 的像光场分布为

$$U_{+1}(x_i, y_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} O(\xi, \eta) h(x_i, y_i; \xi, \eta) d\xi d\eta = \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda} \frac{(d_0 + d_i)}{d_i^2} (x_i^2 + y_i^2)\right] \times \exp\left[\frac{j2\pi}{\lambda d_i (d_i - d - f)} \left(d_\phi - \frac{dd_0}{d_i}\right) (x_r x_i + y_r y_i)\right] O\left[\frac{1}{M} x_i + \frac{d}{M(d_i - d - f)} x_r, \frac{1}{M} y_i + \frac{d}{M(d_i - d - f)} y_r\right]. \quad (9)$$

由(9)式可以看出,物体经该系统后成倒立、放大的像。同时,相对于原始物场而言,再现像光场的相位分布受到了一个二次相位因子和一次相位因子的调制作用,从而使得再现光场中相邻像素间的相位跳变十分厉害,形成欠采样包裹相位图,导致直接相位解包裹出错。由(9)式可得原始像光场的复振幅分布为

$$O(x_i, y_i) = U_{+1}(x_i, y_i) \times P_M(x_i, y_i), \quad (10)$$

式中 $P_M(x_i, y_i)$ 为相位掩模,其值可表示为

$$P_M(x_i, y_i) = \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda} \frac{D}{d_i^2} (x_i^2 + y_i^2)\right] \exp\left[-\frac{j2\pi}{\lambda d_i (d_i - d - f)} \left(d_\phi - \frac{dd_0}{d_i}\right) (x_r x_i + y_r y_i)\right], \quad (11)$$

式中,第一个指数函数表示二次相位掩模量,其中 $D = d_0 + d_i$ 为物体到显微物镜成像区域的距离,实验中需要精确测量 D 的值, d_0 和 d_i 的值则需结合物镜的成像公式($1/d_0 + 1/d_i = 1/f$) 进行求解。第二个指数函数表示一次相位掩模量,其中记录距离 d 的值首先是通过求解 D 与物体到 CCD 光敏面距离 d_i 的差值进行粗测,然后再利用自动聚焦^[10,11] 得到其更精确的值, d_ϕ 的值可由 d 和 d_i 的值求出。由于无法获得此相位掩模中 x_r 和 y_r 的值,即 x_r 和 y_r 是此项中的一个估计值,因此通常在对再现像光场相位预补偿后,一次相位畸变很难彻底消除,而利用单次自动相位补偿方法就能快速、彻底消除剩余的畸变。

4 实验及结果

经理论推导及分析后,建立了相应的实验系统,开展了对人体红细胞的三维成像与测量^[12,13]。实

验的具体参数如下:激光波长 $\lambda = 623.8 \text{ nm}$ 、功率 $P = 60 \text{ mW}$; CCD 像素大小 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ 、像素数 $1392 \text{ pixel} \times 1032 \text{ pixel}$ 、16 bit 灰度级输出; MO_1 和 MO_2 放大倍率为 40、数值孔径为 0.65、焦距为 4.65 mm。首先利用美国军用标准 (USAF) 1951 分辨率测试板对该系统的成像分辨率进行了测定,实验中物体到显微物镜成像区域的距离 $D = 313 \text{ mm}$,物体到 CCD 的距离 $d_i = 212 \text{ mm}$,得到的记录距离 $d = 101 \text{ mm}$,结合透镜成像公式得到的物距 d_0 和像距 d_i 分别为 4.7 mm 和 308 mm,由此得到的分辨率板的结果如图 3 所示。图 3 的 (a)~(d) 分别是等曲率物光和参考光预放大数字全息系统下的全息图、全息图的部分放大部分、全息图的频谱分布及强度再现像,由强度像可以看出该系统的分辨率已经达到、甚至超过了 $0.78 \mu\text{m}$ 。此时,系统的放大倍率 $M = 65$ 。

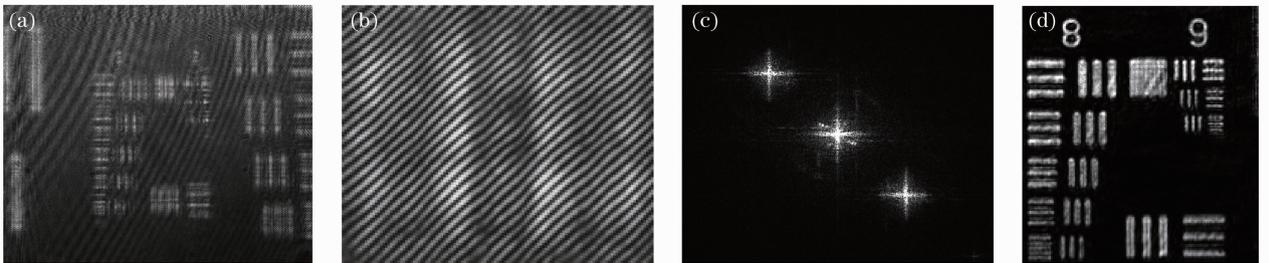


图 3 等曲率预放大数字全息分辨率板实验结果。(a)全息图;(b)全息的部分放大;(c)频谱分布;(d)强度再现像
Fig. 3 Experimental results of USAF 1951 test target with pre-magnification digital holography resolution test panel.

(a) Hologram; (b) part of the magnified hologram; (c) frequency spectrum distribution; (d) intensity image

在分辨率板实验条件的基础上,将待测样品换成血细胞玻片,得到血红细胞的全息图及其频谱分布如图 4(a)和(b)所示^[12,13]。如果不对再现光场的相位做预补偿,而先对再现光场解包裹,然后再进行相位畸变补偿,其重建结果如图 5 所示,图 5(a)是

利用基于横向剪切的最小二乘解包裹算法^[14,15] 直接对再现光场进行解包裹的结果,图 5(b)和(c)分别是在图 5(a)的基础上利用自动相位补偿算法进行多次相位补偿后的重建结果。由图 5 所示结果可以看出,由于畸变相位的存在,使得直接解包裹的结

果产生了较大的错误,并最终影响了整个再现结果的质量,2-D 表示二维。

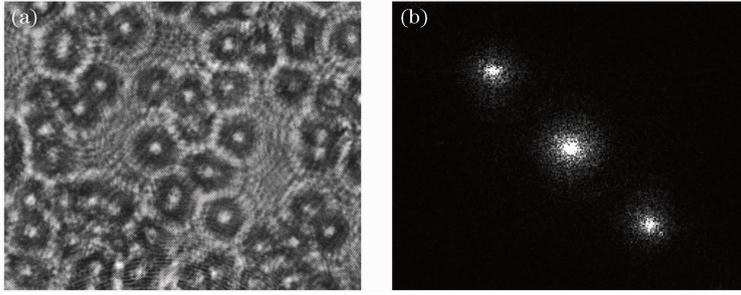


图 4 红细胞的全息图及频谱。(a)全息图;(b)全息图的频谱分布

Fig. 4 Hologram and frequency spectrum of blood cells. (a) Hologram; (b) frequency spectrum of the hologram

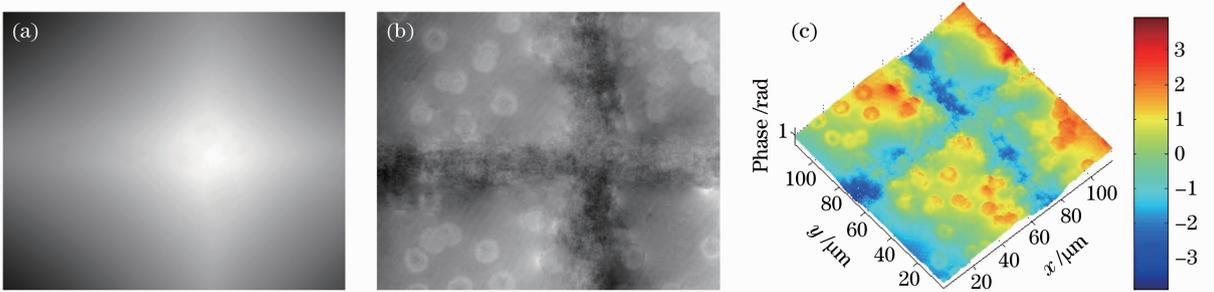


图 5 红细胞直接解包裹的重建结果。(a)直接解包裹的二维相位分布;(b)畸变补偿后的二维相位分布;(c)畸变补偿后的三维相位分布

Fig. 5 Red blood cells reconstructed results of direct unwrapping. (a) 2-D phase distribution of direct unwrapping; (b) 2-D phase distribution after phase aberration compensation; (c) 3-D phase distribution after phase aberration compensation

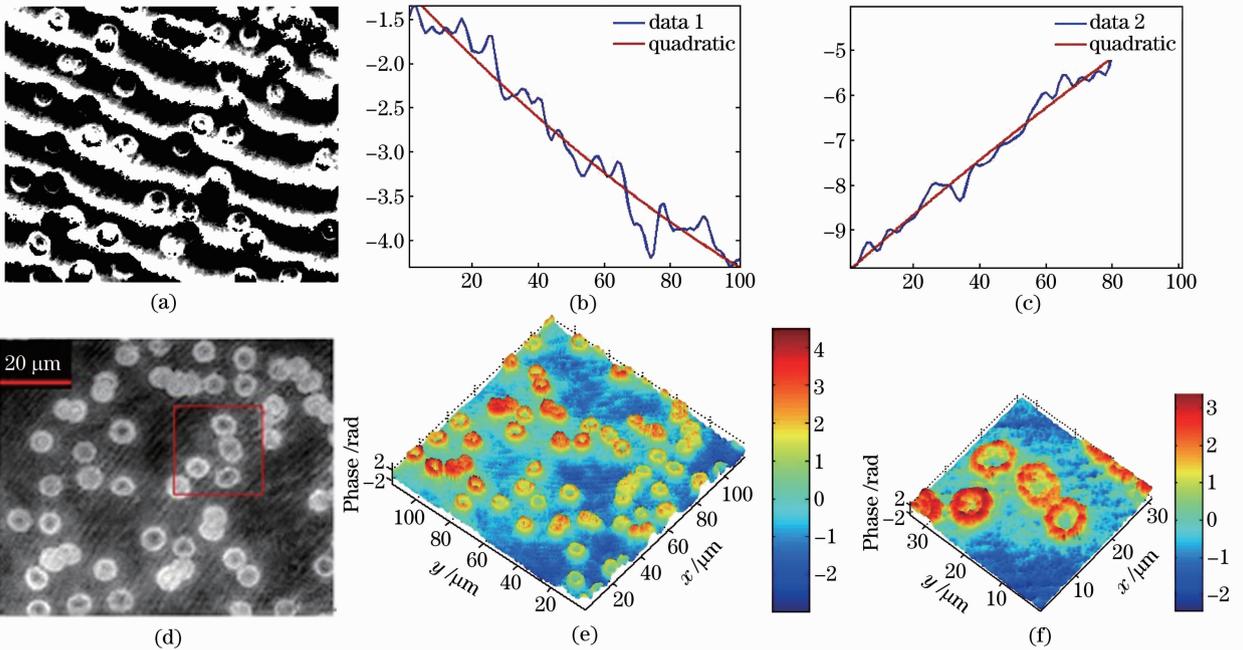


图 6 红细胞相位预补偿重建结果。(a)预补偿后的包裹相位分布;(b)、(c)水平和竖直方向的相位数据及其拟合曲线;(d)畸变补偿后的二维相位分布;(e)畸变补偿后的三维相位分布;(f) (d)中红框部分细胞的三维相位分布

Fig. 6 Red blood cells reconstructed results with pre-compensation. (a) Wrapped phase distribution after pre-compensation; (b), (c) plot of unwrapped phase data and fitted curves in the horizontal and vertical direction; (d) 2-D phase distribution after phase aberration compensation; (e) 3-D phase distribution after phase aberration compensation; (f) 3-D phase distribution in the red box of (d)

对于相同的实验全息图,对其重建时先对再现光场的相位进行预补偿,然后结合自动相位补偿法得到的重建结果如图6所示,图6(a)为对像光场相位做预补偿后血红细胞的包裹相位分布,图6(b)和(c)是在样品的平坦区域沿水平方向和垂直方向的相位数据及拟合曲线,由图6(a)、(b)和(c)可以看出,相位预补偿后,二次相位畸变基本上已经得到了矫正,只剩下了一次相位畸变,一次相位畸变比较容易补偿,采用自动相位补偿法进行补偿,得到细胞的二维及三维相位分布,如图6(d)和(e),图6(f)为图6(d)红框内细胞的三维相位分布。由图6中血红细胞的相位重建结果可以看出,利用理论推导求解成像系统再现光场的相位掩模并对像场做预补偿是十分有意义的。

5 结 论

通过理论分析和实验研究表明,等曲率物光和参考光预放大数字全息显微系统的再现光场受到一个一次相位畸变因子和一个二次相位畸变因子的调制作用,直接对其解包裹会产生解包裹错误;基于再现光场相位畸变模型而得出的相位掩模因子可以有效地消除再现光场中的二次相位畸变,避免相位解包裹错误,最后利用单次自动相位补偿方法可以快速、准确地消除光场中剩余的畸变相位。因此,将相位预补偿法与自动相位补偿方法结合,可以快速、准确地再现预放大数字全息图的三维信息。

参 考 文 献

- 1 G. V. Bally, B. Kemper. Digital holographic microscopy for the life sciences[C]. Biomedical Optics and 3D Imaging OSA, 2012. DW2C
- 2 Bhargab Das, C. S. Yelleswarapu, D. V. G. L. N. Rao. Quantitative phase microscopy using dual-plane in-line digital holography[J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(9): 1387~1395
- 3 Zhang Yizhuo, Wang Dayong, Zhao Jie *et al.*. Investigation on phase unwrapping algorithms in digital holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3323~3327
张亦卓,王大勇,赵洁. 数字全息中实用相位解包裹算法的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3323~3327
- 4 Xie Jianjun. Investigation of the Performance of Digital Holographic System when Used for Microscopic Image [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007. 23~24
谢建军. 离轴数字全息显微成像性能的研究[D]. 北京: 北京工

- 业大学, 2007. 23~24
- 5 S. Zhang. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2010, **48**(2): 149~58
- 6 Ying Xu, Laura Ekstrand, Junfei Dai *et al.*. Phase error compensation for three-dimensional shape measurement with projector defocusing [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50** (17): 2572~2581
- 7 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu *et al.*. Analysis of the characteristic about the digital holography of the spherical reference wave [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24** (9): 1209~1213
钟丽云, 张以谟, 吕晓旭等. 球面参考光波数字全息的一些特点分析及实验[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1209~1213
- 8 Di Jianglei, Zhao Jianlin, Fan Qi *et al.*. Phase correction of wavefront reconstruction in digital holographic microscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 56~61
邸江磊, 赵建林, 范琦等. 数字全息显微术中重建物场波前的相位矫正[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 56~61
- 9 T. Colomb, E. Cucho, 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
- 10 Wang Huaying, Wang Guangjun, Zhao Jie *et al.*. Resolution analysis of imaging system with pre-magnification digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 729~733
王华英, 王广俊, 赵洁等. 预放大数字全息系统的成像分辨率分析[J]. *光子学报*, 2008, **37**(4): 729~733
- 11 Wang Huaying, Wang Guangjun, Wang Dayong *et al.*. Autofocus in digital holographic microscopy [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(8): 1232~1236
王华英, 王广俊, 王大勇等. 数字全息中的自动聚焦[J]. *光子学报*, 2010, **21**(8): 1232~1236
- 12 G. Popescu, Y. K. Park, W. Choi *et al.*. Imaging red blood cell dynamics by quantitative phase microscopy [J]. *Blood Cells, Molecules, and Diseases*, 2008, **41**(29): 10~16
- 13 Wang Yunxin, Wang Dayong, Zhao Jie *et al.*. 3D profile measurement for micro-optical component by using digital holographic microscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0412003
王云新, 王大勇, 赵洁等. 基于数字全息显微成像的微光学元件三维面形检测[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0412003
- 14 Ge Baozhen, Cui Peng, Lü Qieni *et al.*. Implement of phase unwrapping of digital holographic reconstruction image by discrete cosine transform least square method[J]. *J. China University of Petroleum*, 2008, **32**(6): 169~173
葛宝臻, 崔鹏, 吕且妮等. 基于离散余弦变换最小二乘实现数字全息再现像的位相解包裹[J]. *中国石油大学学报*, 2008, **32**(6): 169~173
- 15 Qian Xiaofan, Wang Zhanliang, Hu Te *et al.*. Reconstructing the phase of wavefront using digital hologram and the principle of shearing interferometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1821~1826
钱晓凡, 王占良, 胡特等. 用单幅数字全息和剪切干涉原理重构物场相位[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1821~1826