

基于迈克耳孙干涉仪的非相干数字全息显微成像

张文斌, 刘亚飞, 李德阳, 马凤英, 弓巧侠, 杜艳丽

郑州大学物理工程学院, 河南 郑州 450001

摘要 采用基于迈克耳孙干涉仪的非相干数字全息显微成像系统能够得到物体在非相干光照明下的全息图。对基于迈克耳孙干涉仪的非相干数字全息显微成像系统进行了理论和实验研究。利用标量衍射理论计算了该系统在记录过程中的点扩展函数, 获得了系统横向放大率及重建距离的具体表达式。搭建了基于迈克耳孙干涉仪的非相干数字全息显微成像系统的实验光路, 利用 CCD 记录全息图, 用广义相移数字全息干涉术去除孪生像与零级像, 并用角谱算法得到了清晰的重建像。实现了分辨率板和洋葱表皮细胞等样品的非相干全息显微成像, 验证了该系统的可行性。分辨率板的成像实验表明, 该系统的横向分辨率可达 512 lp/mm。微米洁面刷软毛的成像实验表明, 该系统具有呈现物体三维结构的特性。

关键词 全息; 非相干数字全息; 显微成像; 广义相移数字全息干涉术

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0309001

Incoherent Digital Holographic Microscopic Imaging Based on Michelson Interferometer

Zhang Wenbin, Liu Yafei, Li Deyang, Ma Fengying, Gong Qiaoxia, Du Yanli

College of Physical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract The incoherent digital holographic microscopic imaging system based on the Michelson interferometer can be used to obtain the hologram of object under illumination of incoherent light. The incoherent digital holographic microscopic imaging system based on the Michelson interferometer is studied theoretically and experimentally. The point spread function of the system in the recording process is calculated according to the scalar diffraction theory, and the specific expressions of lateral magnification and reconstruction distance of the system are deduced. An experimental light path of incoherent digital holographic microscopic imaging system based on the Michelson interferometer is built, and a CCD is used to record the holograms. A clear reconstruction image is obtained without conjugate image and zero-order image by the generalized phase-shifting digital holographic interferometry and via the angular spectrum algorithm. Furthermore, the incoherent holographic microscopic imaging of a resolution board and onion epidermal cells is implemented, which proves the feasibility of the system. The imaging experiment of the resolution board shows that a lateral resolution as high as 512 lp/mm can be obtained. The system is able to present the characteristics of the three-dimensional structure of objects, which is verified by the imaging of the micron cleansing brush fur.

Key words holography; incoherent digital holography; microscopic imaging; generalized phase-shifting digital holographic interferometry

OCIS codes 090.1995; 110.6880; 180.6900; 210.4770

1 引言

全息术^[1]最初是利用经物体衍射的电子电磁波与相干的背景波叠加来记录物体的振幅和相位信息, 从

收稿日期: 2016-09-27; 收到修改稿日期: 2016-11-20

基金项目: 河南省自然科学基金(142300410225)、河南省高等学校重点科研项目(15A140038)

作者简介: 张文斌(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事非相干光全息方面的研究。E-mail: zwb140181@126.com

导师简介: 杜艳丽(1979—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事数字全息、光电检测等方面的研究。

E-mail: duyanli@zzu.edu.cn(通信联系人)

而提高电子显微镜的分辨率。Goodman 等^[2]于 1967 年利用计算机再现全息图的思想创立了数字全息技术。数字全息技术是传统光学全息术、计算机技术与光电探测技术相结合的产物,在许多成像应用领域占有独特的优势。全息图能够记录观察场景包含的三维信息^[3],能够对相位物体成像^[4-5],同时全息技术还可以实现超分辨率成像^[6],甚至能够对散射介质中的物体成像^[7]。这些优点令数字全息技术尤其适用于生物样品的测量,使其在光学显微技术的发展和应用中具有非常重要的意义。然而,传统全息技术中激光光源的使用容易产生相干散斑噪声,对系统稳定性的要求较高。近年来,Mertz 等^[8]提出了非相干全息术的概念,利用菲涅耳波带片作为编码孔记录物体的振幅信息和相位信息,避免了传统全息技术中高相干光源引入的相干噪声,使全息术的应用更加广泛。Yamaguchi 等^[9]提出相移数字全息术,通过相移技术解决了同轴全息中的零级像与孪生像干扰原始像的问题,推动了同轴数字全息术的发展。随后非相干数字全息术在不断发现和解决问题的过程中逐渐发展成熟。2007 年,Rosen 等^[10]提出了菲涅耳非相干相关数字全息术(FINCH),采用准单色扩展光源照明,在相位型空间光调制器(SLM)上加加载相位掩模进行衍射分光 and 相移,实现了非相干全息图的记录。Kim^[11]将菲涅耳非相干相关数字全息术的基本原理与迈克耳孙干涉仪原理相结合并用于数字全息中,实现了非相干数字全息图的记录和再现。Rosen 等^[12]进行了荧光物体的非相干数字全息实验,得到每个荧光波长的再现像,再合成得到物体的彩色重建像。Bouchal 等^[13]进一步提高了 FINCH 的分辨率。万玉红等^[14-16]研究了光源相干性与不同相移步数对 FINCH 系统成像分辨率及信噪比的影响,并通过改进三角形干涉光路,提出了非相干光离轴傅里叶彩色数字全息术(IFTCH)。数字全息术不仅具有高灵敏度、高分辨率,以及快速、无损测量等优点,而且图像的存储、再现和传输非常方便灵活,特别适合于显微成像与测量。Brooker 等^[17]充分利用空间光调制器的偏振特性,提高了 FINCH 系统的分辨率,同时将 FINCH 系统应用到荧光全息显微成像中。

在显微测量领域,获得分辨率高、操作简单且能对样品的三维形貌进行同时测量的方法,对显微技术的发展和具有非常重要的意义。近年来,基于非相干光的数字全息显微术^[18-19]发展很快,但是目前的非相干数字全息显微系统多采用压电陶瓷移相器(PZT)或者空间光调制器作为相移元件。压电陶瓷移相器与空间光调制器价格昂贵、使用不便,限制了非相干数字全息显微术的广泛应用。针对这个问题,本文构建了基于迈克耳孙干涉仪的非相干数字全息显微系统,推导出该系统的点扩展函数,并利用广义相移法去除其孪生像和零级像,再现高质量的物体原始信息。该系统对空气扰动、平台震动等实验环境的变化要求较低,同时省去了昂贵的相移器,系统结构简单且易于实现。

2 成像系统分析

2.1 实验系统

图 1 所示为非相干同轴数字全息显微成像系统,用迈克耳孙干涉仪分光,记录物体的非相干全息图。

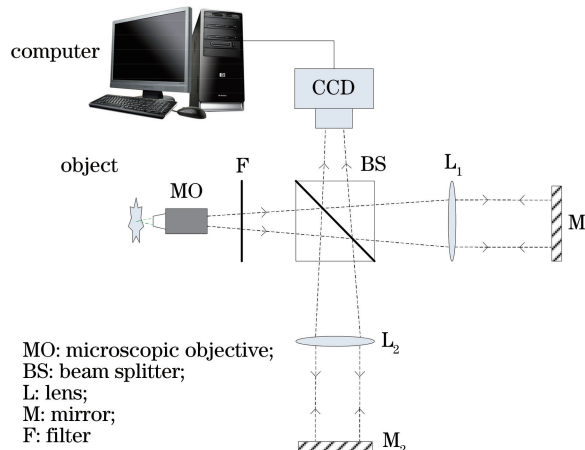


图 1 非相干同轴数字全息显微成像系统示意图

Fig. 1 Schematic of incoherent on-axis digital holographic microscopy imaging system

物体上的任一点发出或者反射的光通过显微物镜 MO 和滤波片 F, 经过分光棱镜 BS 后分成两束光, 其中一束光经过透镜 L_1 后, 在反射镜 M_1 上反射, 再次经过透镜 L_1 、分束器 BS 后进入 CCD; 另一束光经过透镜 L_2 后, 在反射镜 M_2 上反射, 再次经过透镜 L_2 、分束器 BS 后进入 CCD。在操作过程中, 为了获得该点发出的两束自相干光的干涉条纹, 通过调节反射镜 M_2 的前后距离, 控制两束光的光程差在相干长度之内, 则在 CCD 平面上能够记录该点的自相干全息图。由于物体上的任意两点是不相干的, 物体各点的自相干全息图的非相干叠加形成了整个物体的全息图。

2.2 成像理论分析

系统中经迈克耳孙干涉仪分光后的两条光路传播过程类似, 以其中一条光路为例说明该系统的成像原理, 光路展开如图 2 所示。

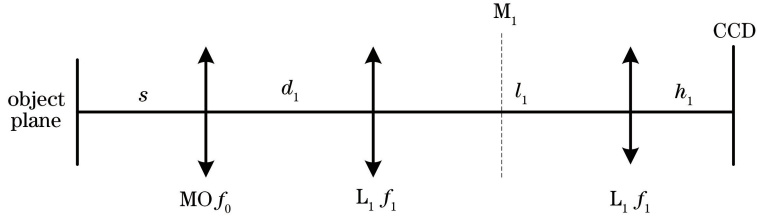


图 2 其中一条光路的展开图

Fig. 2 Expanded view of one light path

物体到物镜 MO 的距离为 s , 物镜 MO 到透镜 L_1 的距离为 d_1 , 透镜 L_1 到反射镜 M_1 的距离为 $l_1/2$, 透镜 L_1 到 CCD 的距离为 h_1 。物镜 MO 的焦距为 f_0 , 透镜 L_1 的焦距为 f_1 。根据标量衍射理论中衍射计算的菲涅耳近似, 可以得到此光路的点扩展函数。

设物平面所在坐标系为 $x_0o_0y_0$, 物镜 MO 所在坐标系为 $x_1o_1y_1$, 第一个透镜 L_1 所在坐标系为 $x_2o_2y_2$, 反射镜后面的第二个透镜 L_2 所在坐标系为 $x_3o_3y_3$, CCD 所在平面透镜的坐标系为 xoy 。

假设物平面内任意一点的坐标为 (x_s, y_s) , 则由菲涅耳传播可知, 该无穷小点反射或发出的光经过距离 s 后, 在物镜 MO 前表面的复振幅为

$$u_1 = \frac{a}{s} \exp(iks) \exp\left\{ \frac{ik[(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2]}{2s} \right\}, \tag{1}$$

式中 a 为常量; k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$ 。根据菲涅耳衍射理论并考虑透镜的相位变换作用 $t_j = \exp[-ik(x_j^2 + y_j^2)/(2f_n)]$, 可得该点反射或发出的光到达 CCD 平面上的复振幅分布为

$$H_{F1}(x, y) = \left\{ \left\{ (u_1 \cdot t_1) \otimes \exp\left[-\frac{ik(x_2^2 + y_2^2)}{2d_1}\right] \right\} \cdot t_2 \otimes \exp\left[-\frac{ik(x_3^2 + y_3^2)}{2l_1}\right] \right\} \cdot t_3 \otimes \exp\left[-\frac{ik(x^2 + y^2)}{2h_1}\right] = M_1 \exp[ih_1(x_s^2 + y_s^2)] \cdot \exp\left\{ \frac{ik[(x - M_{T1}x_s)^2 + (y - M_{T1}y_s)^2]}{2z_1} \right\}, \tag{2}$$

式中 $j=1, 2, 3$, 分别代表不同透镜的相位变换因子; n 取 $0, 1, f_n$ 为对应透镜的焦距; \otimes 代表二维卷积。

同理, 该无穷小点反射或发出的光通过另一条光路后在 CCD 平面上的复振幅分布为

$$H_{F2}(x, y) = M_2 \exp[ih_2(x_s^2 + y_s^2)] \cdot \exp\left\{ \frac{ik[(x - M_{T2}x_s)^2 + (y - M_{T2}y_s)^2]}{2z_2} \right\}, \tag{3}$$

式中 M_1, M_2, h_1, h_2 为常数。

$$M_{T1} = \frac{f_0 f_1^2}{-d_1(2f_1 - l_1)(f_0 - s) + f_1(l_1 - f_1)s + f_0[f_1^2 + l_1s - f_1(l_1 + 2s)]}, \tag{4}$$

$$M_{T2} = \frac{f_0 f_1^2}{-d_2(2f_1 - l_2)(f_0 - s) + f_1(l_2 - f_1)s + f_0[f_1^2 + l_2s - f_1(l_2 + 2s)]}, \tag{5}$$

$$z_1 = \frac{-d_1[f_1^2 + l_1h_1 - f_1(l_1 + 2h_1)](f_0 - s) + f_1[-l_1h_1 + f_1(l_1 + h_1)]s}{d_1(2f_1 - l_1)(f_0 - s) + f_1(f_1 - l_1)s - f_0[f_1^2 + l_1s - f_1(l_1 + 2s)]} +$$

$$\frac{d_1 f_0 \{l_1 h_1 s + f_1^2 (l_1 + h_1 + s) - f_1 [2h_1 s + l_1 (h_1 + s)]\}}{d_1 (2f_1 - l_1)(f_0 - s) + f_1 (f_1 - l_1)s - f_0 [f_1^2 + l_1 s - f_1 (l_1 + 2s)]}, \quad (6)$$

$$z_2 = \frac{-d_2 [f_1^2 + l_2 h_2 - f_1 (l_2 + 2h_2)] (f_0 - s) + f_1 [-l_2 h_2 + f_1 (l_2 + h_2)] s}{d_2 (2f_1 - l_2)(f_0 - s) + f_1 (f_1 - l_2)s - f_0 [f_1^2 + l_2 s - f_1 (l_2 + 2s)]} + \frac{d_2 f_0 \{l_2 h_2 s + f_1^2 (l_2 + h_2 + s) - f_1 [2h_2 s + l_2 (h_2 + s)]\}}{d_2 (2f_1 - l_2)(f_0 - s) + f_1 (f_1 - l_2)s - f_0 [f_1^2 + l_2 s - f_1 (l_2 + 2s)]}, \quad (7)$$

式中 M_{T1}, M_{T2}, z_1, z_2 分别为对应光路的横向放大率和衍射距离。该点发出的两束光在 CCD 平面干涉后的强度分布,即该系统在记录过程中的点扩展函数可表示为

$$I_F(x, y) = |H_{F1}(x, y) + H_{F2}(x, y)|^2 = |H_{F1}(x, y)|^2 + |H_{F2}(x, y)|^2 + H_{F1}(x, y)H_{F2}^*(x, y) + H_{F1}^*(x, y)H_{F2}(x, y) = A + M \exp[ih(x_s^2 + y_s^2)] \exp\left\{\frac{ik[(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2]}{2z}\right\} + M \exp[-ih(x_s^2 + y_s^2)] \exp\left\{\frac{-ik[(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2]}{2z}\right\}, \quad (8)$$

式中 A, M, h 为常数; $M_T = (M_{T1} z_2 - M_{T2} z_1) / (z_2 - z_1)$, 为系统的横向放大率; $z = z_1 z_2 / (z_2 - z_1)$, 为再现距离。

对于非相干光照射的三维物体 $g(x_s, y_s, z_s)$, 物体上所有点的强度分布的非相干叠加形成整个物体的全息图 $I(x, y)$, 则 $I(x, y)$ 可表示为

$$I(x, y) = \iiint_{-\infty-\infty-\infty}^{\infty\infty\infty} g(x_s, y_s, z_s) I_F(x, y) dx_s dy_s dz_s = \iiint_{-\infty-\infty-\infty}^{\infty\infty\infty} A g(x_s, y_s, z_s) dx_s dy_s dz_s + \iiint_{-\infty-\infty-\infty}^{\infty\infty\infty} M g(x_s, y_s, z_s) \exp[ih(x_s^2 + y_s^2)] \exp\left\{\frac{ik[(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2]}{2z}\right\} dx_s dy_s dz_s + \iiint_{-\infty-\infty-\infty}^{\infty\infty\infty} M g(x_s, y_s, z_s) \exp[-ih(x_s^2 + y_s^2)] \exp\left\{\frac{-ik[(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2]}{2z}\right\} dx_s dy_s dz_s. \quad (9)$$

2.3 重建方案

实验中,拍摄同一物体在不同时刻的 3 幅全息图。拍摄时环境中空气的扰动、实验平台的机械震动、平面反射镜的微弱震动等因素会导致拍摄的 3 幅全息图之间存在相移量。设 3 张全息图分别为 $H_1(x, y)$ 、 $H_2(x, y)$ 和 $H_3(x, y)$, $H_1(x, y)$ 相对于 $H_2(x, y)$ 的相移量为 α_1 , $H_2(x, y)$ 相对于 $H_3(x, y)$ 的相移量为 α_2 。传统的三步相移法^[10,20]用的是定步长标准相移算法,相移量是确定的,但是用该系统拍摄时,由于实验条件和仪器震动的影响,引入的相移量是不确定的,所以用三步广义相移法^[21-22]计算相移量 α_1 和 α_2 。将 3 幅全息图叠加可去除孪生像与零级像。对获得的全息图用角谱法^[23]进行数值重建,得到物体原始图像 $H(x, y)$, 即

$$H(x, y) = H_1 \{ \exp[i(\alpha_1 + \alpha_2)] - \exp(i\alpha_1) \} + H_2 \{ 1 - \exp[i(\alpha_1 + \alpha_2)] \} + H_3 [\exp(i\alpha_1) - 1]。 \quad (10)$$

3 实验结果

基于以上理论分析,利用图 1 的实验光路,以氙灯(CEL-TCX250,北京中教金源科技有限公司,250 W)作为非相干光源照明物体进行非相干全息显微成像实验,记录物体的非相干同轴菲涅耳全息图。图 1 中显微物镜 MO(放大倍率为 $20\times$)的数值孔径(NA)为 0.4,工作距离为 5 mm。滤光片 F 的中心波长为 632.8 nm,半带宽为 10 nm。实验时,当物体处于显微物镜 MO 的最佳焦距处时,物体本身与显微物镜 MO 的距离很近,很难直接测量间距 s ,因此直接测量物平面到分束器 BS 的距离,此距离为 240 mm。两个透镜 L_1 和 L_2 的焦距均为 150 mm。分束器 BS 到透镜 L_1 的距离为 30 mm,到透镜 L_2 的距离为 35 mm,到 CCD 的距离为 105 mm,透镜 L_1 到平面反射镜 M_1 的距离为 135 mm,透镜 L_2 到平面反射镜 M_2 的距离为 130 mm。CCD(C8484-05G02,滨松公司,日本)像素点数为 1024×1344 ,像素点尺寸为 $6.45\ \mu\text{m}\times 6.45\ \mu\text{m}$ 。为便于后续处理,拍摄时 CCD 只使用 $750\ \text{pxiel}\times 750\ \text{pixel}$ 。

先后对不同样品进行显微成像实验,当物体为 USAF1951 分辨率板时,实验结果如图 3 所示。

图 3(a)~(c)是在不同时刻拍摄的 3 张全息图,图 3(d)是广义相移法去除孪生像和零级像后,用角谱衍射算法重建后得到的原始像,重建距离为 0.6 mm。如图 3 所示,采用非相干同轴数字全息显微成像系统(图 1)可以看清分辨率板第 9 层的第一组线对,分辨率可达 512 lp/mm,且重建噪声小,图像质量好。实验结果表明,该系统在非相干光照明下能够快速获得物体的全息图,采用广义相移算法可以得到清晰的重建像。为验证系统具有三维成像的特性,在同样的实验参数下,用微米洁面刷的软毛进行实验。实验时把微米洁面刷的两根软毛交叉叠放在载玻片上,用胶带固定,结果如图 4 所示。

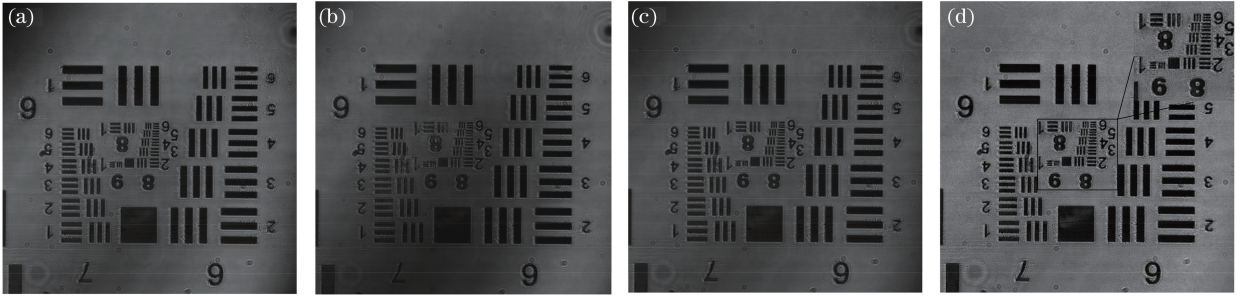


图 3 分辨率板的全息图和重建像。(a)(b)(c)不同时刻拍摄的 3 张全息图;
(d)经过数值重建得到的重建像(右上角为局部放大)

Fig. 3 Holograms and reconstructed image of the resolution board. (a)(b)(c) Three holograms captured at different time; (d) reconstructed image by numerical reconstruction (partial enlargement is shown at the top-right corner)

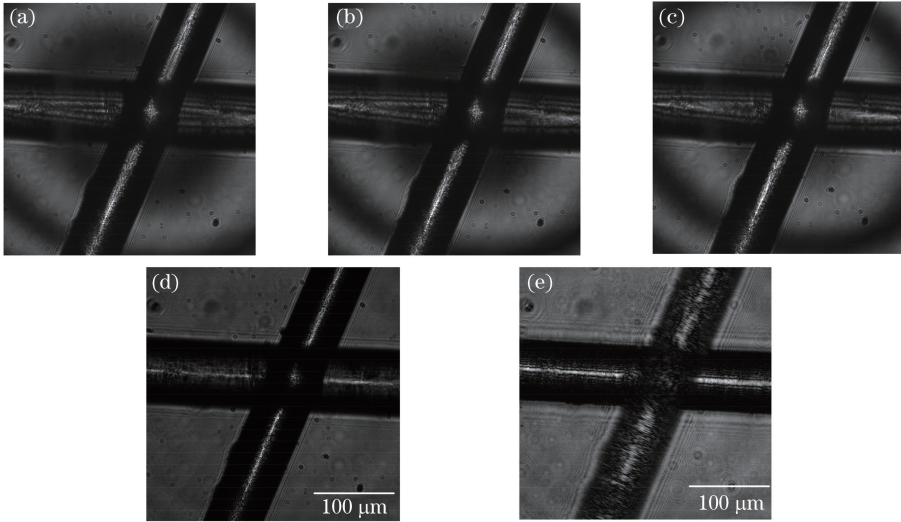


图 4 微米洁面刷软毛全息图与不同重建距离下的数值重建像。(a)(b)(c) 3 张全息图;
(d)上方软毛在最佳焦平面时的重建像;(e)下方软毛在最佳焦平面时的重建像

Fig. 4 Holograms of the micron cleansing brush fur and reconstructed images at different distances. (a)(b)(c) Three holograms; (d) reconstructed image when the top of fur is at the best focus plane; (e) reconstructed image when the bottom of fur is at the best focus plane

图 4(a)~(c)是记录的 3 张全息图;图 4(d)是上方软毛在最佳焦平面上的数值重建像,这时下方软毛不在最佳焦平面上,重建距离为 1 mm;图 4(e)是下方软毛在最佳焦平面上的数值重建像,这时上方软毛不在最佳焦平面上,重建距离为 18 mm。结果表明,利用计算机数字重建,能够实现对三维物体上任意平面的数字聚焦。可见,该系统可以实现三维物体显微成像。

为了验证该系统的实用性,在同样的实验参数下,将洋葱表皮切片作为待测样品进行实验,结果如图 5 所示。

图 5(a)~(c)是不同时刻拍摄的 3 张全息图,图 5(d)是广义相移法去除孪生像和零级像后,用角谱衍射算

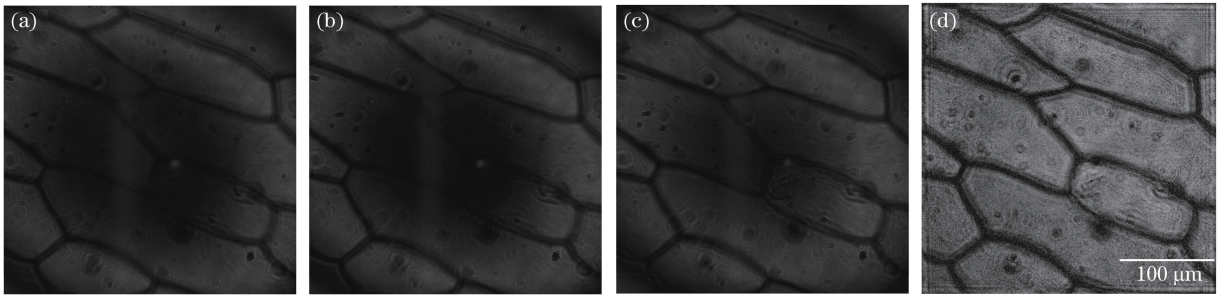


图 5 洋葱表皮细胞的全息图与重建像。(a)(b)(c) 3 张全息图;(d) 经过数值重建得到的重建像

Fig. 5 Holograms and reconstructed image of onion epidermal cells. (a)(b)(c) Three holograms;
(d) reconstructed image by numerical reconstruction

法重建后得到的原始像,重建距离为 15 mm。在图 5(d)中可以看到洋葱表皮细胞的细胞壁和内部细胞核。

上述实验结果表明,基于迈克耳孙干涉仪搭建的非相干数字显微全息系统能够获得非相干光照射下物体的全息图,通过广义相移法去除零级像与孪生像干扰,用角谱法对叠加后的全息图进行数值重建可以获得清晰的三维物体信息。

4 结 论

基于迈克耳孙干涉仪搭建了非相干数字全息显微系统记录物体的三维信息。首先,从标量衍射理论出发推导出系统的点扩展函数,得到横向放大率和再现距离;其次,通过非相干光照射下分辨率板和洋葱表皮细胞实验验证了该系统的可行性,通过记录微米洁面刷软毛的非相干全息图并数字重建其三维图像验证了该系统的三维成像特性。该系统结构简单,无需扫描和连续切片技术即可获得物体的非相干全息图,且成像速度快。同时,该系统无需依赖常规非相干同轴全息系统必须采用的相移器,对环境和系统光学平台防震的要求都较低,能够广泛应用到物体显微结构的观察中;其在医学、生物及材料分析等领域也具有潜在的应用价值。本研究中的理论和实验讨论均是基于相移技术进行的,为适应动态物体的观测与记录,将进一步开展基于压缩传感重构的单次曝光非相干同轴数字全息成像技术的研究。

参 考 文 献

- [1] Gabor D. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, 161(4098): 777-778.
- [2] Goodman J W, Lawrence R W. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. *Applied Physics Letters*, 1967, 11(3): 77-79.
- [3] Yeom S, Javidi B, Ferraro P, *et al.* Three-dimensional color object visualization and recognition using multi-wavelength computational holography[J]. *Optics Express*, 2007, 15(15): 9394-9402.
- [4] Cuhe E, Marquet P, Depeursinge C. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(34): 6994-7001.
- [5] Shaked N T, Newpher T M, Ehlers M D, *et al.* Parallel on-axis holographic phase microscopy of biological cells and unicellular microorganism dynamics[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(15): 2872-2878.
- [6] Mico V, Zalevsky Z, García-Martínez P, *et al.* Superresolved imaging in digital holography by superposition of tilted wavefronts[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(5): 822-828.
- [7] Almoro P F, Pedrini G, Gundu P N, *et al.* Phase microscopy of technical and biological samples through random phase modulation with a diffuser[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(7): 1028-1030.
- [8] Mertz L, Young N O. *Fresnel transformation of images*[C]. London: Optical Instruments and Techniques, 1961: 305-310.
- [9] Yamaguchi I, Zhang T. Phase-shifting digital holography[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(16): 1268-1270.
- [10] Rosen J, Brooker G. Digital spatially incoherent Fresnel holography[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(8): 912-914.
- [11] Kim M K. Full color natural light holographic camera[J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9636-9642.
- [12] Rosen J, Brooker G. Fluorescence incoherent color holography[J]. *Optics Express*, 2007, 15(5): 2244-2250.
- [13] Bouchal P, Kapitán J, Chmelik R, *et al.* Point spread function and two-point resolution in Fresnel incoherent

- correlation holography[J]. Optics Express, 2011, 19(16): 15603-15620.
- [14] Wan Y H, Man T L, Wang D Y. Incoherent off-axis Fourier triangular color holography[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 8565-8673.
- [15] WanYuhong, Man Tianlong, Tao Shiquan. Imaging characteristics and research progress of incoherent holography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209004.
万玉红, 满天龙, 陶世荃. 非相干全息术成像特性及其研究进展[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209004.
- [16] Chen Hao. Investigation of key problems on Fresnel incoherent correlation digital holography[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013: 19-58.
陈 昊. 菲涅尔非相干相关数字全息术关键问题研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013: 19-58.
- [17] Brooker G, Siegel N, Wang V, *et al.* Optimal resolution in Fresnel incoherent correlation holographic fluorescence microscopy[J]. Optics Express, 2011, 19(6): 5047-5062.
- [18] Bouchal P, Bouchal Z. Wide-field common-path incoherent correlation microscopy with a perfect overlapping of interfering beams[J]. Journal of the European Optical Society Rapid Publications, 2013, 8: 13011.
- [19] Teeranutrannont S, Yoshimori K. Digital holographic three-dimensional imaging spectrometry [J]. Applied Optics, 2013, 52(1): A388-A396.
- [20] Liu Yingchen. Recording and reconstruction of Fresnel incoherent digital holography[D]. Guangzhou: South China Normal University, 2013: 10-12.
刘英臣. 菲涅尔非相干数字全息术的记录和再现[D]. 广州: 华南师范大学, 2013: 10-12.
- [21] Li Deyang, Du Yanli, Zhang Wenbin, *et al.* Study of incoherent on-axis digital holography imaging system[J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2015, 26(6): 1157-1161.
李德阳, 杜艳丽, 张文斌, 等. 非相干同轴数字全息成像系统研究[J]. 光电子•激光, 2015, 26(6): 1157-1161.
- [22] Xu Xianfeng. Theoretical and experimental study of the algorithms of phase shift extraction and wave-front reconstruction in digital generalized phase-shifting interferometry[D]. Jinan: Shandong University, 2008: 53-58.
徐先锋. 广义相移数字全息干涉术相移提取及波前再现算法的理论及实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2008: 53-58.
- [23] Li Junchang, Song Qinghe, Pascal P, *et al.* Discussion of wavefront reconstruction algorithm of off-axis digital holography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209008.
李俊昌, 宋庆和, Pascal P, 等. 离轴数字全息波前重建算法讨论[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209008.