

文章编号: 0253-2239(2010)02-0352-06

基于双色光照明的单曝光同轴数字全息技术

潘卫清¹ 鲁伟²

(¹ 浙江科技学院理学院, 浙江 杭州 310023
² 中国科学院上海光学与精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 提出了一种基于双色光照明的单曝光同轴数字全息技术。在红绿蓝三色中, 任选两种波长的光来照射物体, 采用彩色 CCD 记录双色同轴全息图, 然后经过三基色分离数字处理, 可得到两幅不同波长的同轴全息图。用角谱衍射理论对该技术进行了分析, 表明在降低物参光振幅比的条件下, 通过对同轴数字全息图求自然对数, 可近似得到衍射物光及其共轭之和, 其误差与物参光振幅比有关。取两幅不同波长的同轴数字全息图, 经自然对数处理后, 用传递函数可以很好地重构出物体图像, 给出了具体的数字处理算法。用仿真实验, 模拟了该技术的全息记录和处理过程, 得到重构图像的峰值信噪比(PSNR)为 14.2 dB。结果表明该方法可以去除孪生衍射像干扰, 可以实现清晰的单曝光同轴全息成像。最后, 分析了再现像中噪声产生的原因。该技术可用于基于同轴全息的实时成像与动态测量。

关键词 数字全息; 同轴全息; 单曝光; 双色光

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.0352

Double Wavelength One-Shot In-Line Digital Holography

Pan Weiqing¹ Lu Wei²

(¹ Department of Physics, Zhejiang Science and Technology University, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)
(² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A novel technique of one-shot in-line digital holography based on double wavelength illumination was proposed. Two wavelength beams in color of red, green or blue (RGB) are simultaneously used to illuminate the object and produce the in-line digital hologram (DH). After recording the hologram by a color CCD, two in-line DHs recorded with different wavelengths can be obtained by separating the color image into RGB channels. The angular spectrum theory of diffraction was applied in the analysis of the proposed technique. On weakening the object wave in comparison to the reference wave, the summation of the diffraction object wave and its conjugation can be approximately obtained by logarithmizing the in-line DH. The approximating error lies on the object and reference wave ratio. Then the object image can be reconstructed from the two in-line DHs of different wavelengths by applying the transfer function. The reconstruction method was presented. Computer simulations and simple experiment were given to demonstrate the technique. The peak signal noise ratio (PSNR) of the reconstructed image is about 14.2 dB. Which shows this method could erase the interference of twin diffraction image. Finally, the noise sources of the reconstructed images were simply analyzed. This technique can be used for real time imaging and dynamic measuring based in-line digital holography.

Key words digital holography; in-line holography; one-shot; double wavelength

1 引言

数字全息借助光电探测器和数字处理技术可获取物光的相位信息^[1,2], 还原物的三维形貌^[3,4], 提

高光学成像分辨率^[5,6]。数字全息技术近年来受到了众多研究者的关注, 其横向分辨率可达亚波长量级, 在粒子场测量、显微观测、形变振动测量和信息

收稿日期: 2009-04-09; 收到修改稿日期: 2009-05-12

基金项目: 浙江省优秀青年教师(0202108833)资助课题。

作者简介: 潘卫清(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事信息光学和光电测试等方面的研究。

E-mail: pan_weiqing@163.com

加密等领域有着广泛应用。

根据物参光夹角大小可把数字全息分为离轴全息和同轴全息。离轴全息虽然可以将孪生像、背景光与再现物光分开,但 3 个衍射分量仍然同时出现在再现视场中,降低了 CCD 像素的有效利用率。同轴全息由于物参光的入射方向相同,在 CCD 上形成的干涉条纹间距较大,容易满足 Nyquist 采样条件,从而可以缩短记录距离,提高图像分辨率。但其缺点是再现像会受到背景噪声和孪生像的干扰。目前常用移相技术来解决再现像的分离问题^[7]。但由于需要分时记录多幅不同移相量的全息图,该方法一般不能用于实时成像和动态测量。近年来已有研究人员提出了两种并行移相同轴全息的方案,以期实现基于同轴全息的动态测量。第一种方案^[8,9]是利用空分复用的原理,在参考光路中插入一个阵列移相器件,使入射参考光的波面,在移相器的不同像素位置,并行产生多种不同的移相量,干涉条纹经单曝光记录后,通过数字处理,分别提取属于同一移相量的像素,再经过插值处理,得到多幅带有不同移相量的同轴全息图。然而该技术因为需要特殊的移相器件不易推广,该器件制作困难,而且对照明光的波长有选择,通用性较差,另外光路调节也很麻烦,要求移相器件的每个像素通过透镜成像后与 CCD 的像素一一对准。第二种方案^[10]是采用偏振复用原理,在参考光路中插入 $\lambda/4$ 波片,产生两束相位差为 $\pi/2$ 的正交偏振光,同时与物光干涉,然后用一个偏振检波 CCD 来记录全息图,再经过数字处理,提取相同偏振态的像素,得到两幅正交移相全息图。该技术需要使用特殊的 CCD,给实验带来了困难。另外,用减背景光强的方法也可以削弱孪生像的干扰,有人对此进行了理论分析^[11],发现该方法适用于富含高频信息的小物体成像和识别^[12]。Y. Zhang 等^[13]提出,在物参光比低于一定值的情况下,使用两个 CCD,同时记录两幅不同距离的同轴全息图,可以恢复出高质量的物波像。

本文提出了一种基于波分复用原理的,双色光照明和彩色记录的,单曝光同轴全息技术。讨论了该技术的理论分析、数字记录与处理方法并对该技术进行了仿真和实验验证,最后进行了讨论。

2 数字记录与处理方法

实现本文技术的单曝光同轴全息记录光路如图 1 所示, λ_1, λ_2 为波长; M1, M2, M3 为反射镜; BS1, BS2, BS3 为分束镜; NF 为中性滤光片。波长为 λ 的

光经准直和分束后,分成两束光:一束经中性滤波片(NF)衰减后照射非色散物体^[14],形成物光 $u_o(x, y)$, u_o 表示物体表面任意单色光在 (x, y) 处的振幅和相位^[15],物光经过 z 距离的传播到达 CCD 记录面,形成衍射物光场 $u(x, y, \lambda)$;另一束未经调制的光经两次反射后也到达 CCD 记录面,作为参考光。调节反射镜 M3,使参考光的入射方向与衍射物光一致,则两光束在 CCD 表面干涉形成同轴全息图,其表达式为

$$I(x, y, \lambda) = [r + u(x, y, \lambda)][r + u(x, y, \lambda)]^*, \quad (1)$$

式中“*”表示共轭, r 是一常数,表示平面参考光。

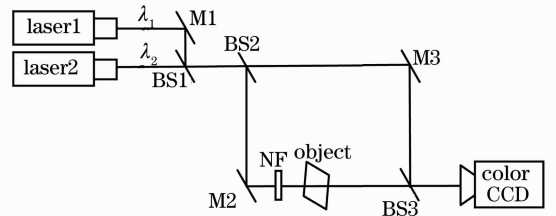


图 1 双波长同轴全息记录光路

Fig. 1 Recording scheme of the double wavelength in-line holography

由角谱衍射理论可知,衍射物光场 u 与物体表面光场 u_o 的关系可用角谱衍射公式表示为

$$u(x, y, \lambda) = \mathcal{F}^{-1}\{U_o(f_x, f_y)H(f_x, f_y, \lambda)\}, \quad (2)$$

式中 $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$ 表示傅里叶逆变换, $U_o(f_x, f_y) = \mathcal{F}\{u(x, y)\}$ 是物体表面光场的空间频谱, H 是传递函数

$$H(f_x, f_y, \lambda) = \exp\left[jkz \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}\right]. \quad (3)$$

通过调节中性滤波片(NF),使衍射物光振幅远小于参考光的振幅,即 $u/r \ll 1$,则(1)式除以预先记录的参考光强 r^2 后可近似为

$$\frac{I(x, y)}{r^2} = \left[1 + \frac{u(x, y, \lambda)}{r}\right] \left[1 + \frac{u(x, y, \lambda)}{r}\right]^* \approx \exp\left[\frac{u(x, y, \lambda) + u^*(x, y, \lambda)}{r}\right], \quad (4)$$

其近似误差约为 $u^2(x, y, \lambda)/2r^2$, 如果物参光振幅比为 0.1, 则其近似误差约为 0.5%^[13]。

对(4)式求自然对数得

$$l(x, y, \lambda) = \ln\left[\frac{I(x, y)}{r^2}\right] = \frac{u(x, y, \lambda) + u^*(x, y, \lambda)}{r}, \quad (5)$$

再对(5)式做傅里叶变换得

$$L(f_x, f_y, \lambda) = \frac{U_o(f_x, f_y)H(f_x, f_y, \lambda) + U_o^*(-f_x, -f_y)H^*(f_x, f_y, \lambda)}{r}, \quad (6)$$

式中 $U_o(f_x, f_y), U_o^*(-f_x, -f_y)$ 是待求的物体表面光波及其共轭波的频谱, 如果用两个波长为 λ_1, λ_2 的光来记录全息图, 则可以得到以下两个方程组

$$\begin{cases} L(f_x, f_y, \lambda_1) = \frac{U_o(f_x, f_y)H(f_x, f_y, \lambda_1) + U_o^*(-f_x, -f_y)H^*(f_x, f_y, \lambda_1)}{r} \\ L(f_x, f_y, \lambda_2) = \frac{U_o(f_x, f_y)H(f_x, f_y, \lambda_2) + U_o^*(-f_x, -f_y)H^*(f_x, f_y, \lambda_2)}{r} \end{cases}, \quad (7)$$

解该方程组可得

$$U_o(f_x, f_y) = \frac{r[L(f_x, f_y, \lambda_1)H^*(f_x, f_y, \lambda_2) - L(f_x, f_y, \lambda_2)H^*(f_x, f_y, \lambda_1)]}{H(f_x, f_y, \lambda_1)H^*(f_x, f_y, \lambda_2) - H(f_x, f_y, \lambda_2)H^*(f_x, f_y, \lambda_1)}. \quad (8)$$

最后对(8)式做傅里叶逆变换就可以得到重构的物体图像。在全息记录中, 如果照明光选红绿蓝(RGB)三色中的任意两种, 则可用彩色 CCD 同时记录下两种波长的同轴全息图, 然后通过三基色分离数字处理, 得到两幅数字全息图, 再由(8)式得到再现物光。

3 仿真与实验

3.1 计算机仿真

仿真中假定 CCD 像素 $400 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$, 像元尺寸 $0.01 \text{ mm} \times 0.01 \text{ mm}$, 记录面尺寸 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 记录距离 $z=220 \text{ mm}$, 照明光选红、绿两色, 其波长为 $\lambda_1=633 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2=520 \text{ nm}$, 物参光振幅比设为 0.5, 待成像的物体如图 2(a) 所示。通过菲涅耳衍射计算得到单曝光双色同轴数字全息如图 2(b) 所示, 对该双色数字全息图做三基色分离数字处理, 分别得到红光和绿光所记录的两幅数字全息图, 如图 2(c) 和 (d) 所示。仿真中没有考虑 CCD 对两种光谱线响应曲线不一致的问题, 实际处理中可通过数字处理的方法, 对 CCD 的响应谱线进行矫正和补偿, 也可以对分离后的数字全息图做归一化

进行补偿。然后根据所得到的这两幅数字全息图数据, 按照(8)式的处理方法, 得到重构的物体图像, 如图 3(a) 所示。为了做对比, 还模拟了由单幅红光同轴全息图, 如图 2(c) 所示, 经低通滤波, 去除直流干扰项后的菲涅耳再现全息图, 如图 3(b) 所示。比较两幅重构图像, 可明显看出, 用本文方法再现的数字全息图中不存在孪生像的干扰, 只有少量由指数函数近似引入的加性噪声, 所以图像非常清晰。而普通同轴数字全息再现像中, 由于存在严重的孪生衍射像干扰, 图像很模糊, 经过低通滤波后, 图像还出现了对比度翻转的现象。

为了定量描述重建图像的质量, 图 4 给出了两种方法的归一化重建图像与归一化标准物图像的方差(SE)。引入常用的图像质量评价方法——峰值信噪比(PSNR)

$$f_{\text{PSNR}} = 10 \lg \frac{L \times L}{f_{\text{MSE}}}, \quad (9)$$

式中 L 是图像灰度值范围, f_{MSE} 为灰度均方误差。以图 2(a) 为标准, 用 f_{PSNR} 计算得到, 图 3(a) 的图像质量为 14.2 dB, 图 3(b) 的图像质量为 2.8 dB。

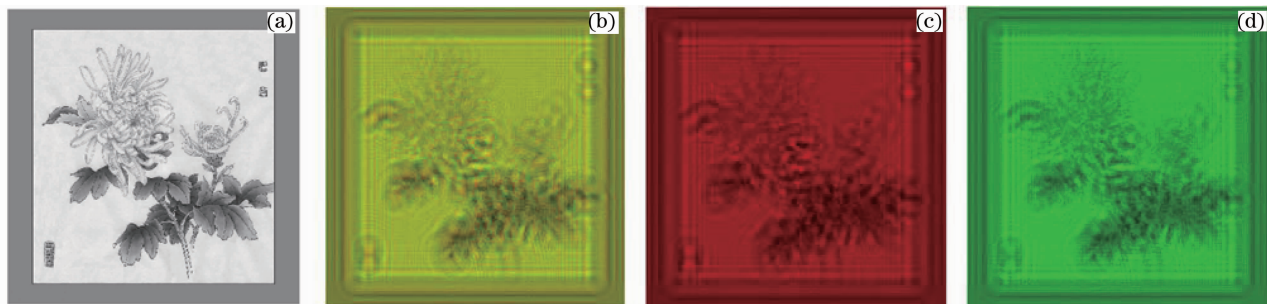


图 2 (a) 用于仿真的待成像物体; (b) 双色同轴数字全息图; (c) 红光记录的全息图; (d) 绿光记录的全息图
Fig. 2 (a) Original object for imaging; (b) double wavelength in-line DH; (c) DH recorded with red light; (d) DH recorded with green light

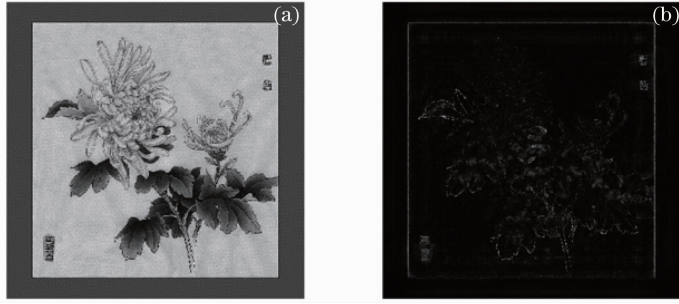


图 3 (a)单曝光双色同轴全息再现像;(b)去直流项的普通同轴全息再现像

Fig. 3 Reconstructed image of one-shot double wavelength in-line DH (a) and reconstructed image of simple in-line DH after filtering the direct term (b)

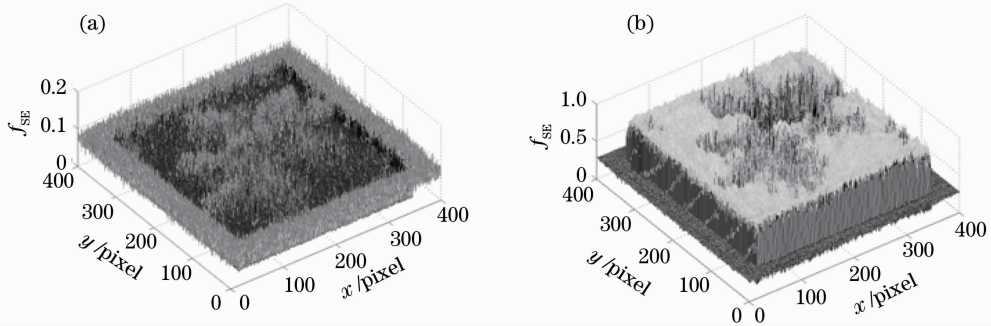


图 4 (a)双色同轴全息再现像的灰度方差图;(b)普通同轴全息再现像的灰度方差图

Fig. 4 Square error figures: of the reconstructed image of double wavelength DH (a) and of the recorded image of simple in-line DH (b)

3.2 实 验

由于找不到蓝、绿色激光器,故在实验中采用一个中心波长为 532.5 nm,功率为 20 mW 的激光二极管,作为绿光的相干光源,通过迈克耳孙干涉测量,其相干长度大于 150 mm。红光光源采用波长为 632.8 nm,功率为 35 mW 的 He-Ne 激光器。记录物体是一张刻有三条狭缝的不透明纸片,如图 5(a)所示,狭缝宽度约 0.7 mm。全息记录的 CCD 采用 JT-2133 彩色 CCD 相机,CCD 尺寸为 3.6 mm×2.7 mm,像素 640 pixel×480 pixel。记录光路如图 1 所示,记录距离为 131 mm。光路调节中,首先要对红光进行衰减,使光强与绿光相当,然

后精心调整反射镜 M1 和分束镜 BS1,使两束光共轴重合,并垂直照射带狭缝的纸片,实验中还要小心调整反射镜 M3 和分束镜 BS3,使物参光方向一致,通过对物光的衰减调节,物参光强度比约为 0.1。通过单曝光记录的双色同轴数字全息如图 5(b)所示。然后通过三色分离数字处理,得到红绿蓝三个通道记录的全息图,如图 6 所示。图 6(a),(b)分别是红和绿光通道记录的红波长和绿波长的全息图,图 6(c)是由于 CCD 的蓝光通道对红绿二色光滤光不完全所记录下来,仍属于双色混合全息图。对图 6(a)和图 6(b)两幅数字全息图,按(8)式进行重构处理,得到重构后的物体图像如图 7(a)所示,为了便于比较,对物体做

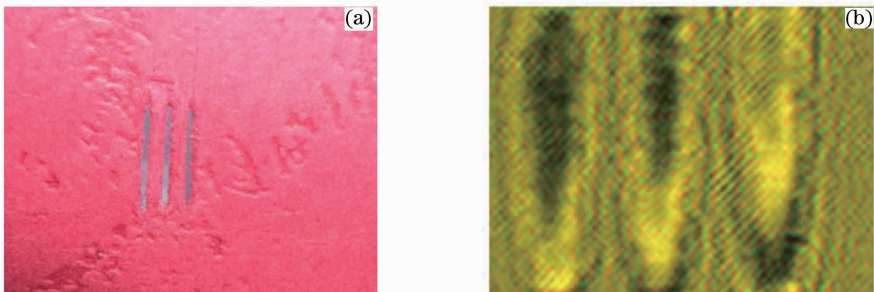


图 5 (a)记录物体;(b)单曝光双色同轴全息

Fig. 5 Original object for recording (a) and single-shot double wavelength in-line DH (b)

了四步移相同轴全息记录,其重构图像如图 7(b)所示,图 7(c)给出了两幅再现像的方差图。比较图 7(a)和图 7(b),可以发现采用本文方法可以较清晰地再现物体图像,图中没有明显的孪生像干扰,图像边缘较清晰。但不足的是,图中存在较强的背景噪声,图像对比度较低,图像质量为 9.55 dB。产生这些噪声的原因主要有 3 点:1)指数函数近似和取对数去

直流分量不完全引入的噪声;2)光路调节中红绿光、物参光不完全共轴引入的噪声;3)CCD 记录中红绿光记录通道滤光不完全引入的噪声等。通过减小物参光的振幅比,精确调节光路,适当调节全息图的光照度及采用性能优良的彩色 CCD,相信可以取得更好的再现效果。

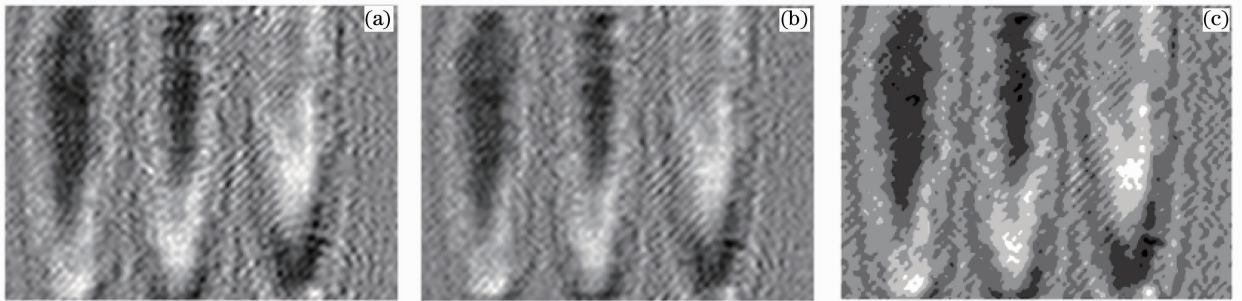


图 6 (a)红光同轴全息;(b)绿光同轴全息;(c)蓝色通道的双色混合全息

Fig. 6 Red light in-line DH (a) recorded by the red channel, green light in-line DH (b) recorded by the green channel and double wavelength in-line DH (c) recorded by the blue channel

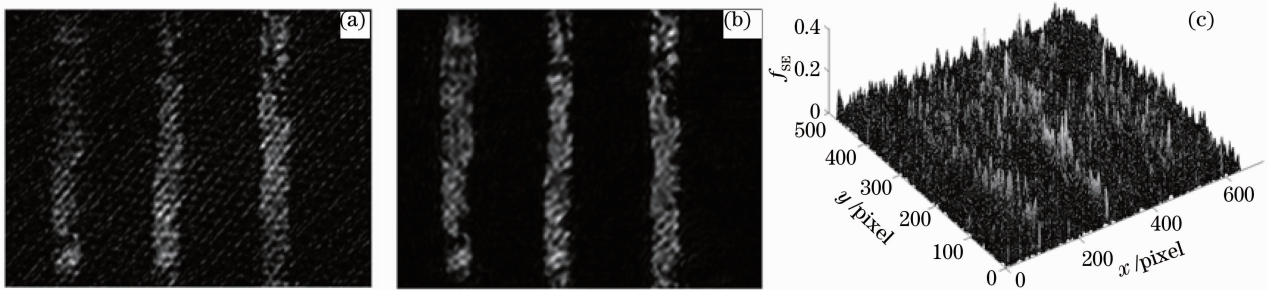


图 7 (a)单曝光双色同轴全息再现像;(b)相移同轴全息再现像;(c)两再现像的灰度方差图

Fig. 7 Reconstructed image of one-shot double wavelength in-line DH (a), reconstructed image of phase shifting in-line DH (b) and square error figure (c) of the two reconstructed images

4 结 论

提出了一种新的单曝光同轴数字全息技术。用衍射理论对该技术进行了分析和论证,给出了记录方法和数字处理方法。该技术充分利用彩色 CCD 可同时记录 RGB 三种颜色的波分复用特性,考虑采用两个基色波长的光同时照明物体,在降低物参光振幅比的条件下,经一次曝光,记录一幅双色混合的同轴数字全息图,再经数字处理得到两幅不同波长的全息图。然后对分离后的数字全息图做自然对数和傅里叶变换数字处理,结合已知的传递函数矩阵,可以重构出物体图像,从而实现清晰的单曝光同轴全息成像。通过计算机仿真,模拟了该技术的记录和再现过程,其重构物象的峰值信噪比为 14.2 dB,图像清晰,没有孪生衍射像的干扰。用实验对该技术进行了验证,并对实验中影响再现像质量的因素

进行了分析,给出了改善的途径。本文所提技术,相对于普通的同轴全息,只增加了一个不同波长的激光器,光路简洁。该技术可以充分利用同轴全息大视场和高分辨等技术优势,实现基于同轴全息的实时成像和动态测量。

参 考 文 献

- 1 P. Marquet, B. Rappaz, P. J. Magistretti *et al.*. Digital holographic microscopy: a noninvasive contrast imaging technique allowing quantitative visualization of living cells with subwavelength axial accuracy[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(5): 468~470
- 2 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校正[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 56~61
- 3 D. Carl, B. Kemper, G. Wernicke *et al.*. Parameter-optimized digital holographic microscope for high-resolution living-cell

- analysis[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(36): 6536~6544
- 4 Feng Zhongyao, Jia Fang, Zhou Jinghui *et al.*. Three-dimensional surface shape measurement of big objects by image splicing in digital holography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 2017~2021
冯忠耀, 贾 昉, 周景会 等. 数字全息中利用图像拼接测量大物体的三维形貌[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 2017~2021
- 5 Vicente Mico, Zeev Zalevsky, Pascuala García-Martínez *et al.*. Superresolved imaging in digital holography by superposition of tilted wavefronts[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(5): 822~828
- 6 Pan Weiqing, Zhu Yongjian, Lu Wei *et al.*. Super-resolution digital holography by beam scanning [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 299~303
潘卫清, 朱勇建, 鲁 伟 等. 光束扫描超分辨数字全息[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 299~303
- 7 I. Yamaguchi, T. Zhang. Phase-shifting digital holography [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16): 1268~1270
- 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 T. Nomura, S. Murata, E. Nitanaï *et al.*. Phase-shifting digital holography with a phase difference between orthogonal polarizations[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(20): 4873~4877
- 11 A. Stern, B. Javidi. Theoretical analysis of three-dimensional imaging and recognition of micro-organisms with a single-exposure on-line holographic microscope[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2007, **24**(1): 163~168
- 12 B. Javidi, I. Moon, S. Yeom *et al.*. Three-dimensional imaging and recognition of microorganism using single-exposure on-line (SEOL) digital holography[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(12): 4492~4506
- 13 Y. Zhang, G. Pedrini, W. Osten *et al.*. Reconstruction of in-line digital holograms from two intensity measurements[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(15): 1787~1789
- 14 M. K. Kim. Wavelength-scanning digital interference holography for optical section imaging [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(23): 1693~1695
- 15 L. Yu, M. K. Kim. Wavelength-scanning digital interference holography for tomographic three-dimensional imaging by use of the angular spectrum method [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(16): 2092~2094