

光束扫描超分辨数字全息

潘卫清¹ 朱勇建² 鲁 伟³ 王建中¹ 胡 炜¹

(¹ 浙江科技学院, 浙江 杭州 310023; ² 湖南大学, 湖南 长沙 410082)
³ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 根据超分辨成像理论,提出了一种基于光束扫描的超分辨数字全息记录与再现技术。用菲涅耳衍射理论证明了该技术可有效增大 CCD 探测器的等效尺寸和系统截止频率,从而提高数字全息成像分辨率。计算机仿真验证了该方法的正确性与可行性。对光束扫描全息记录系统进行了详细描述,对该数字全息术的再现方法进行了具体说明。对比合成孔径数字全息术,该技术在全息记录中无需反复移动 CCD 探测器,也不必反复调整参考光以避免出现欠采样。

关键词 数字全息;超分辨;菲涅耳衍射;光束扫描

中图分类号 TB877 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0299

Super-Resolution Digital Holography by Beam Scanning

Pan Weiqing¹ Zhu Yongjian² Lu Wei³ Wang Jianzhong¹ Hu Wei¹

¹ Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

² Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

³ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Based on super-resolution imaging theory, a beam scanning super-resolution digital holographic technique is proposed. Applying Fresnel diffraction theory, this technique is proved to enlarge the equivalent dimension of CCD and increase the cutoff frequency of optical system, so this method can improve the imaging resolution of digital holography. The simulation verify the validity and feasibility of this method. The method of hologram processing and reconstruction is summarized. Compared with synthetic-aperture digital holography, the proposed technique needs not to move CCD camera and change the angle of reference waves that correspond to different CCD camera position for avoiding under-sampling.

Key words digital holography; super-resolution; Fresnel diffraction; beam scanning

1 引 言

数字全息借助光电探测器和数字处理技术可获得物光的相位信息^[1],还原物的三维形貌^[2~3],提高光学成像分辨率^[4]。数字全息的横向分辨率可达微纳量级,在粒子场测量、显微观测、形变振动测量和信息加密等领域^[5~8]有着广泛应用。然而与传统全息记录相比,数字全息术的主要缺点是记录全息图的 CCD 等光电探测器光敏面尺寸小、分辨率低,从而限制了数字全息对高频信息的记录。为了克服以上缺陷,已有许多文献报道了各种解决方法,如相移数字全息术^[9],通过消除同轴全息中共轭项的干扰,提高探测器空间带宽积的有效利用率;合成孔径数字全息术^[10],通过移动 CCD 记录多幅不同位置的数字全息,综合成一幅大而清晰的数字全息等。

根据超分辨成像理论,要使成像系统的分辨率超越瑞利分辨极限,需使原来被截止的高频信息通过成像系统,常用的办法是利用冗余的光学系统自由度如时间自由度和偏振自由度等来提高图像的空间分辨率。

本文提出一种新的超分辨数字全息技术,在传统的数字全息光路中加入光束偏转装置,将物体的高频信息依次下载到系统的通频带内并进行全息记录,然后用数字处理技术将多幅载有物体不同频带信息的全息图进行处理和拼接,最后再现出一幅超过系统瑞利分辨极限的物体图像。

2 系统与理论分析

数字全息可视为一种借助计算机再现的相干光

学成像系统,它的截止频率受到 CCD 探测器尺寸的限制^[11,12]。为了增大系统的通频带,提高成像分辨率,最直接的办法就是增大探测器的尺寸,合成孔径全息就是基于该思想提出来的。本文提出另一种可行的技术,即保持系统截止频率(CCD)不变,而通过改变照明光的方向将物体的高频信息下载到通频带内,最后综合出一幅高分辨率的还原图像,原理如图 1 所示。

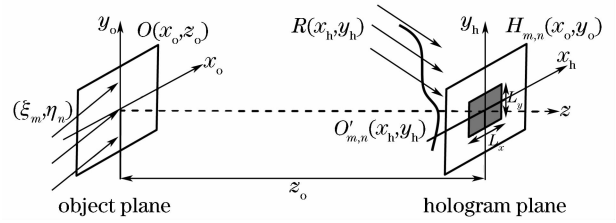


图 1 光束扫描数字全息原理图

Fig. 1 Scheme for beam scanning digital holography

设有 $(2N+1)(2M+1)$ 束空间频率分别为 (ξ_m, η_n) 的平面光波依次去照明物体,物的透过率函数为 $O(x_o, y_o)$,则与照明光空间频率 (ξ_m, η_n) 相应的出射物光场可表示为

$$O_{m,n}(x_o, y_o) = O(x_o, y_o) \exp[j2\pi(\xi_m x_o + \eta_n y_o)], \quad (1)$$

式中 $m = -M, -M+1, \dots, 0, \dots, M-1, M; n = -N, -N+1, \dots, 0, \dots, N-1, N$ 。

在傍轴近似下,经过距离 z_o 的非涅耳衍射到达全息记录面的光场可表示为

$$\begin{aligned} O'_{m,n}(x_h, y_h) &= \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z_o}(x_h^2 + y_h^2)\right] \iint_{-\infty}^{\infty} O_{m,n}(x_o, y_o) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z_o}(x_o^2 + y_o^2)\right] \exp\left[-j2\pi\left(\frac{x_h x_o}{\lambda z_o} + \frac{y_h y_o}{\lambda z_o}\right)\right] dx_o dy_o = \\ &= \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z_o}(x_h^2 + y_h^2)\right] \widetilde{F}\left\{O(x_o, y_o) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z_o}(x_o^2 + y_o^2)\right]\right\} \left(\frac{x_h}{\lambda z_o} - \xi_m, \frac{y_h}{\lambda z_o} - \eta_n\right), \end{aligned} \quad (2)$$

式中忽略了常复数因子, $\widetilde{F}\{\cdot\}$ 表示傅里叶变换, λ 为照明光的波长。从(2)式可见,通过调整照明光的入射角 $(\lambda\xi_m, \lambda\eta_n)$,可实现物体频谱的平移。

设到达全息面的平面参考光为

$$R(x_h, y_h) = a \exp[j2\pi(\xi_r x_h + \eta_r y_h)], \quad (3)$$

式中 ξ_r, η_r 为参考光的空间频率,它的选择应满足奈奎斯特采样条件和分离条件^[13]。

设 CCD 尺寸为 $L_x \times L_y$,则所记录的子全息图为

$$\begin{aligned} H_{m,n}(x_h, y_h) &= |O'_{m,n}(x_h, y_h) + R(x_h, y_h)|^2 \text{rect}\left(\frac{x_h}{L_x}, \frac{y_h}{L_y}\right) = \\ &= \left| \widetilde{F}\left\{O(x_o, y_o) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z_o}(x_o^2 + y_o^2)\right]\right\} \left(\frac{x_h}{\lambda z_o} - \xi_m, \frac{y_h}{\lambda z_o} - \eta_n\right) \right|^2 \text{rect}\left(\frac{x_h}{L_x}, \frac{y_h}{L_y}\right) + a^2 \text{rect}\left(\frac{x_h}{L_x}, \frac{y_h}{L_y}\right) + \\ &= \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z_o}(x_h^2 + y_h^2)\right] \widetilde{F}\left\{O(x_o, y_o) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z_o}(x_o^2 + y_o^2)\right]\right\} \left(\frac{x_h}{\lambda z_o} - \xi_m, \frac{y_h}{\lambda z_o} - \eta_n\right) \times \\ &= a \exp[-j2\pi(\xi_r x_h + \eta_r y_h)] \text{rect}\left(\frac{x_h}{L_x}, \frac{y_h}{L_y}\right) + \\ &= \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda z_o}(x_h^2 + y_h^2)\right] \widetilde{F}^* \left\{O(x_o, y_o) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z_o}(x_o^2 + y_o^2)\right]\right\} \left(\frac{x_h}{\lambda z_o} - \xi_m, \frac{y_h}{\lambda z_o} - \eta_n\right) \times \\ &= a \exp[j2\pi(\xi_r x_h + \eta_r y_h)] \text{rect}\left(\frac{x_h}{L_x}, \frac{y_h}{L_y}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式由四个子项叠加组成,为了表述方便,依次用 $T_1(x_h, y_h), T_2(x_h, y_h), T_3(x_h, y_h), T_4(x_h, y_h)$ 表示该四子项,由三、四两子项可见,CCD 的尺寸大小决定了系统的有限通频范围,而通过调节照明光的入射方向 $(\lambda\xi_m, \lambda\eta_n)$ 可实现物体频谱在全息记录面上的平移,因此通过多次扫描记录可得到带有不同频带信息的 $(2N+1)(2M+1)$ 幅子全息图。

光束扫描数字全息的记录系统如图 2 所示。这

是一个类似马赫-曾德尔干涉仪的光路,激光经扩束准直后被分束镜 1 分为两束,其中一束经过光束偏转装置如双光楔旋转棱镜^[14]、声光偏转器^[15]等,去照射物体形成物光。另一束则作为参考光,经反射镜反射,经分束镜 2 与物光合束后,照射到 CCD 探测器上形成全息图。在全息记录过程中,计算机先发出控制指令驱动光束偏转装置,使照明光束产生一个给定的出射角,然后控制 CCD 进行全息记录。

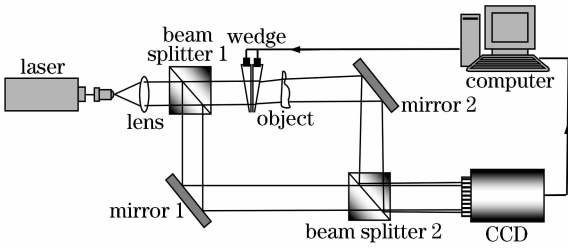


图 2 光束扫描数字全息记录光路图

Fig. 2 Recording scheme of beam scanning digital holography

由于光束扫描无需移动大的机械部件,可实现快速高精度控制,增加了全息记录的方便性。而在整个记录过程中,CCD 与物体的相对位置没有发生变化,即 CCD 表面的物光与其法线的最大夹角不会发

生变化^[14],所以在整个扫描记录过程中,不必重新调整参考光的方向来避免出现欠采样。

由(4)式可知物体的频谱信息包含在三、四两项中,为了还原物场分布只需对该两项中的任一项进行处理还原出物的频谱带,然后作平移拼接得到一幅大的物体全息频谱图,最后对其作傅里叶变换即可得到高分辨率的物场分布。下面以对第三项的处理为例说明该数字全息术的再现方法。由(4)式可知,子全息图中的物体频谱受到二次相位因子 $\exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z_o}(x_h^2 + y_h^2)\right]$ 的调制并且发生了 $(\lambda z_o \xi_m, \lambda z_o \eta_n)$ 的空间平移,因此为了还原物的原有频谱分布,需先将子全息图做二次相位解调处理,然后作逆向平移,则处理后全息图的第三项为

$$\exp\left[-j\pi \frac{(x_h + \lambda z_o \xi_m)^2 + (y_h + \lambda z_o \eta_n)^2}{\lambda z_o}\right] T_3(x_h + \lambda z_o \xi_m, y_h + \lambda z_o \eta_n) = \tilde{F}\left\{O(x_o, y_o) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z_o}(x_o^2 + y_o^2)\right]\right\} \left(\frac{x_h}{\lambda z_o}, \frac{y_h}{\lambda z_o}\right) \times a \exp[-j2\pi(\xi_r x_h + \eta_r y_h)] \exp[-j2\pi(\lambda z_o \xi_m \xi_r + \lambda z_o \eta_n \eta_r)] \text{rect}\left(\frac{x_h + \lambda z_o \xi_m}{L_x}, \frac{y_h + \lambda z_o \eta_n}{L_y}\right), \quad (5)$$

由(5)式可见子全息图经平移后出现了一个线性相位因子 $\exp[-j2\pi(\lambda z_o \xi_m \xi_r + \lambda z_o \eta_n \eta_r)]$ 调制,它的存在会使各子全息图拼接后,在傅里叶变换再现时出现图像偏移导致模糊。为了消除该相位因子,需事先对子全息图进行相位补偿,然后进行平移拼接,即

$$\sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \exp\left[-j\pi \frac{(x_h + \lambda z_o \xi_m)^2 + (y_h + \lambda z_o \eta_n)^2}{\lambda z_o}\right] \times \exp[j2\pi(\lambda z_o \xi_m \xi_r + \lambda z_o \eta_n \eta_r)] T_3(x_h + \lambda z_o \xi_m, y_h + \lambda z_o \eta_n) = \tilde{F}\left\{O(x_o, y_o) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z_o}(x_o^2 + y_o^2)\right]\right\} \left(\frac{x_h}{\lambda z_o}, \frac{y_h}{\lambda z_o}\right) a \exp[-j2\pi(\xi_r x_h + \eta_r y_h)] \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \text{rect}\left(\frac{x_h + \lambda z_o \xi_m}{L_x}, \frac{y_h + \lambda z_o \eta_n}{L_y}\right), \quad (6)$$

由(6)式可知,若控制好扫描光束的入射角度,使其等于 CCD 对物面所成张角的整数倍即

$$\lambda \xi_m = m L_x / z_o, \quad \lambda \eta_n = n L_y / z_o, \quad (7)$$

则子全息图经处理和拼接后相当于一幅大尺寸 CCD 所记录的全息图,从而有效增大了系统的截止频率,提高了成像分辨率。最后对拼接处理后的全息图进行傅里叶变换即可还原出物的原始光场。一个完整的数字全息再现处理过程可表示为

$$\tilde{O}(x_i, y_i) = \tilde{F}\left\{\sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \exp\left[-j\pi \frac{(x_h + \lambda z_o \xi_m)^2 + (y_h + \lambda z_o \eta_n)^2}{\lambda z_o}\right] \times \exp[j2\pi(\lambda z_o \xi_m \xi_r + \lambda z_o \eta_n \eta_r)] H_{m,n}(x_h + \lambda z_o \xi_m, y_h + \lambda z_o \eta_n)\right\}, \quad (8)$$

与(8)式相对应的全息再现物理过程如图 3 所示。

在图 3 中置于全息拼图前面的棱镜,对应于(8)式中的线性相位因子 $\exp[j2\pi(\lambda z_o \xi_m \xi_r + \lambda z_o \eta_n \eta_r)]$, 严格来讲该棱镜应该是台阶状的,紧贴子全息图后面的凸透镜对应于(8)式中的二次相位因子

$\exp\left[-j\pi \frac{(x_h + \lambda z_o \xi_m)^2 + (y_h + \lambda z_o \eta_n)^2}{\lambda z_o}\right]$, 其焦距为 λz_o , 而傅里叶变换透镜则对应(8)式中的傅里叶变换运算,该装置在平面光照明下,就可以在傅里叶透镜的后焦面出现物体的清晰再现像。

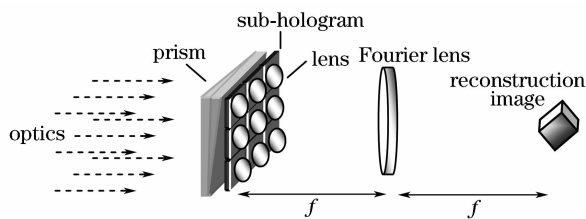


图 3 光束扫描数字全息再现的物理过程

Fig. 3 Physical process of beam scanning digital hologram reconstruction

3 仿真实验

为了直观地说明该技术的超分辨率效果,用 Matlab 软件进行了数值仿真。实验中采用 600×600 的计算矩阵,假定 CCD 大小为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$,像元尺寸为 $0.04 \text{ mm} \times 0.04 \text{ mm}$,记录面尺寸为 $5.12 \text{ mm} \times 5.12 \text{ mm}$,记录距离 $Z_0 = 758 \text{ mm}$,记录和再现光波长 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$,参考光的入射角为 0.003 rad 。首先用图 4(a) 所示直径为 0.01 mm 的小孔来测试数字全息成像系统的脉冲响应函数。在图 4 中(b)为其传统数字全息图,中央记录的全息数据为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$,为了提高再现像的显示分辨率便于比较,将其数据通过补零扩

展至 $600 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$,图中所显示的黑色部分即为补零扩展的数据。通过改变照明光沿 x 和 y 方向的出射角,进行 3×3 次扫描记录,然后经处理拼接后得到的扫描数字全息图如图 4(c) 所示,其中照明光出射角选择满足(7)式关系。图 4(c) 的数据是从 $384 \text{ pixel} \times 384 \text{ pixel}$ 经补零扩展至 $600 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$ 得到的,显然图中存在明显的拼接痕迹。图 4(d), (e) 分别对应(b), (c) 再现出的小孔三维光强分布图,左上角为相应的小孔像,即两全息成像系统的脉冲响应函数。从图 4 可见,传统数字全息术的脉冲响应函数存在明显的旁瓣,相应光斑比较宽,而采用本文方法得到的脉冲响应函数明显变窄,说明其分辨率已超过了前者。理论上如果采用更多次扫描拼接,则其脉冲响应可接近理想的 δ 函数。为了进一步验证该技术的成像效果,还对图 5(a) 所示鉴别率板进行了全息记录和再现模拟。在仿真实验中鉴别率板尺寸设为 $3.2 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$ 。图 5(b), (c) 分别为鉴别率板的传统数字全息图和 3×3 次扫描拼接数字全息图,扩展后的数据规模都统一为 $600 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$, (d), (e) 分别为(b), (c) 的再现像。从图 5(d), (e) 明显可见,扫描数字全息再现像要比传统数字全息再现像在清晰度上有显著改善。

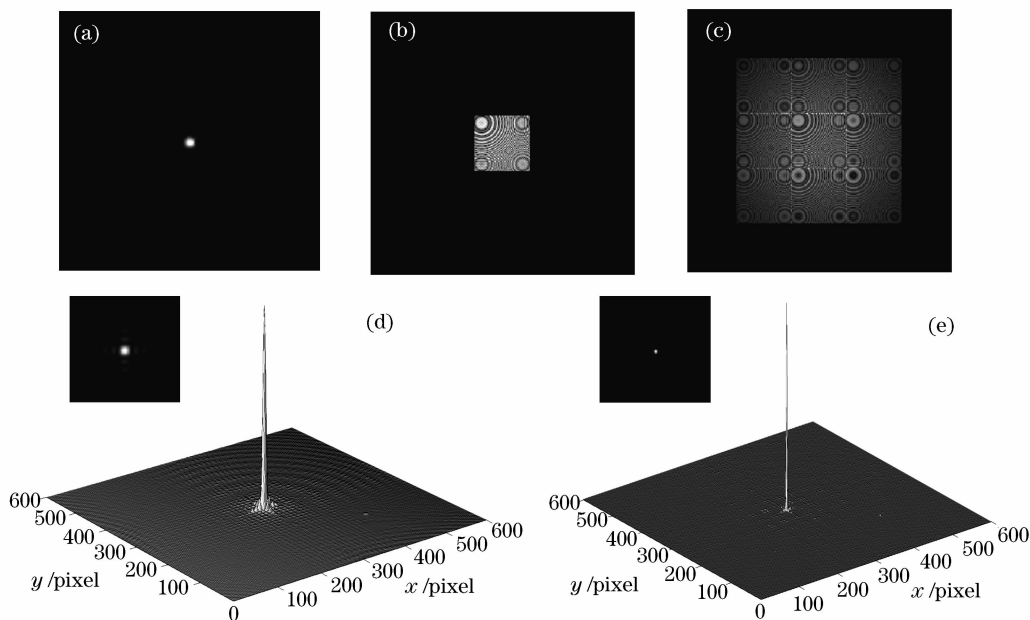


图 4 直径 0.01 mm 的小孔(a)及其全息与再现图:(b) 传统数字全息图, (c) 3×3 光束扫描数字全息图, (d) 图(b)的再现像, (e) 图(c)的再现像

Fig. 4 (a) The circle with diameter 0.01 mm , and its hologram and reconstructed images; (b) traditional digital hologram, (c) beam scanning digital hologram, (d) and (e) reconstructed images of Fig. 4(b) and (c) respectively

4 结 论

从理论上提出了一种新的基于光束扫描的超分

辨数字全息技术,证明了该技术可有效增大全息成像系统的截止频率,从而提高成像分辨率。在记录

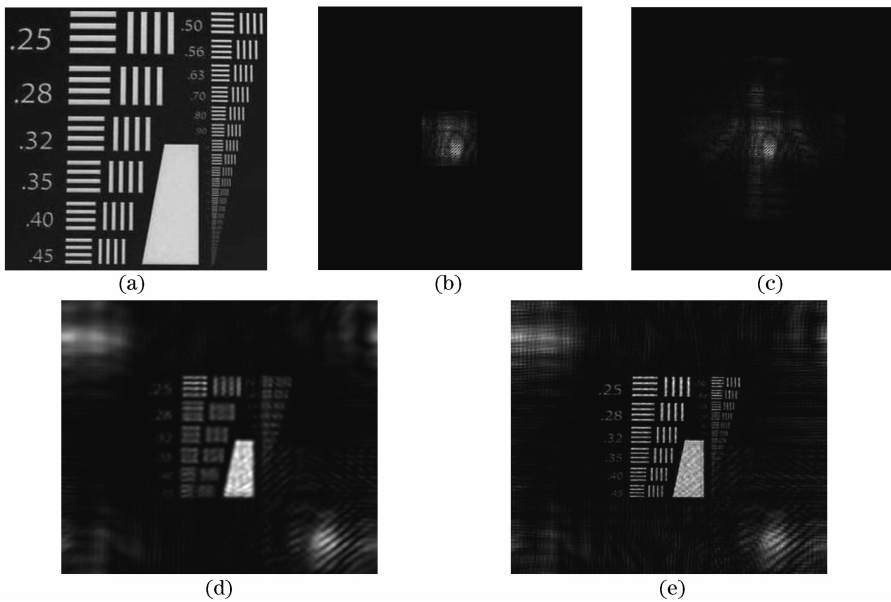


图5 鉴别率板(a)及其全息与再现图:(b)传统数字全息图,(c)3×3光束扫描数字全息图,(d)图(b)的再现像,(e)图(c)的再现像

Fig. 5 (a) The resolution test pattern, and its hologram and reconstructed images; (b) traditional digital hologram, (c) beam scanning digital hologram, (d) and (e) reconstructed images of Fig. 5(b) and (c) respectively

光路上,相比传统数字全息术只增加了一个光束偏转装置,用于改变照明光的方向,使照明光产生一系列等于 CCD 对物面所成张角整数倍的偏转角。在全息再现时,先对各子全息图进行二次相位解调和一次相位补偿,得到物的不同频带图,然后进行平移拼接得到一幅大的物体频谱图,最后进行傅里叶变换得到再现像。仿真实验验证了该技术具有超分辨性能。由于该技术在全息记录时无需移动大的机械部件,且不改变 CCD 与物体之间的相对位置,因此容易实现快速高精度控制,且不必重新调整参考光方向来避免欠采样问题。

参 考 文 献

- 1 P. Marquet, B. Rappaz, 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 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
- 3 F. Pietro, G. Simonetta, A. Domenico *et al.*. Extended focused image in microscopy by digital holography [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(18):6738~6749
- 4 W. S. Haddad, D. Cullen, J. C. Solem *et al.*. Fourier-transform holographic microscope [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(24):4973~4978
- 5 S. Murata, M. Yasuda. Potential of digital holography in

- particle measurement [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2000, **32**(8):567~574
- 6 G. Coppola, P. Ferraro, M. Iodice *et al.*. A digital holographic microscope for complete characterization of microelectromechanical systems [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2004, **15**(3):529~539
- 7 G. Pedrini, H. J. Tiziani, M. E. Gusev. Pulsed digital holographic interferometry with 694- and 347-nm wavelengths [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(2):246~249
- 8 X. Wang, D. Zhao, F. Jing *et al.*. Information synthesis (complex amplitude addition and subtraction) and encryption with digital holography and virtual optics [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(4):1476~1486
- 9 I. Yamaguchi, T. Zhang. Phase-shifting digital holography [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16):1268~1270
- 10 J. H. Massig. Digital off-axis holography with a synthetic aperture [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **27**(24):2179~2181
- 11 M. K. Thomas. Frequency analysis of digital holography [J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(4):771~778
- 12 M. K. Thomas. Frequency analysis of digital holography with reconstruction by convolution [J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(8):1829~1839
- 13 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
- 14 Li Anhu, Sun Jianfeng, Liu Liren. Design and analysis of high accuracy light beam deflection device [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9):1379~1383
- 李安虎,孙建锋,刘立人. 高准确度光束偏转装置的设计与分析 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(9):1379~1383
- 15 G. K. Knopf, D. Nancoo. Optical control using an acousto-optic scanner [C]. *SPIE*, 2003, **5264**:170~178