

文章编号: 0258-7025(2007)12-1670-06

# 数字全息显微系统的成像分辨率分析

王华英<sup>1,2</sup>, 王广俊<sup>1,3</sup>, 赵 洁<sup>1</sup>, 谢建军<sup>1</sup>, 王大勇<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京工业大学应用数理学院, 北京 100022  
<sup>2</sup> 河北工程大学理学院, 河北 邯郸 056038; <sup>3</sup> 河南省计量科学研究院, 河南 郑州 450008)

**摘要** 根据成像理论和全息系统的点扩散函数,研究了数字全息显微系统的成像分辨率,给出了无预放大和有预放大情况下成像分辨率的表达式,指出了只有当 CCD 的成像分辨率等于或高于显微物镜(MO)的成像分辨率时,预放大数字全息系统的成像分辨率才取决于显微物镜的数值孔径(NA);反之,系统的成像分辨率则取决于 CCD 的数值孔径。采用无透镜傅里叶变换全息记录光路,对美国空军分辨率测试板进行了实验研究,结果表明再现像在水平和垂直方向的极限分辨率分别为  $3.91 \mu\text{m}$  和  $4.38 \mu\text{m}$ ,与理论分析相吻合。对条纹物体进行了全息图的模拟记录和再现,结果与理论分析相一致。

**关键词** 全息;预放大;显微;分辨率;无透镜傅里叶变换全息

**中图分类号** TB 877 **文献标识码** A

## Imaging Resolution Analysis of Digital Holographic Microscopy

WANG Hua-ying<sup>1,2</sup>, WANG Guang-jun<sup>1,3</sup>, ZHAO Jie<sup>1</sup>, XIE Jian-jun<sup>1</sup>, WANG Da-yong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China  
<sup>2</sup> College of Science, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China  
<sup>3</sup> Henan Institute of Metrology, Zhengzhou, Henan 450008, China)

**Abstract** According to optical imaging theory and the point spread function of digital holographic system, the imaging resolution of the digital holographic microscopy was investigated. The imaging resolution expressions of the digital holographic systems with and without pre-magnification were presented in details. With those formulas, it is clearly shown that only when the imaging resolution of CCD is not below the resolution of the microscope objective (MO), the imaging resolution of the whole system is dependent on the numerical aperture (NA) of MO. Otherwise, it is dependent on the numerical aperture of the CCD. Experimental imaging of US air force-resolution test target is performed using the lensless Fourier transform configuration. The experimental results that ultimate resolution of reconstructed image in horizontal direction and vertical direction is  $3.91 \mu\text{m}$  and  $4.38 \mu\text{m}$  respectively. Finally, recording and reconstructing of holograms for stripe object are stimulated, and results are corresponding with theoretical analysis.

**Key words** holography; pre-magnification; microscopy; resolution; lensless Fourier transform holography

## 1 引言

数字全息技术不仅具有高灵敏、高准确、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,使其特别适合于显微成像

与测量。近年来,数字全息技术已经发展成为微观领域一种新的测试工具,并应用于微光学<sup>[1]</sup>、生命科学<sup>[2~5]</sup>、半导体<sup>[6]</sup>、微机电系统<sup>[7,8]</sup>等领域。

成像分辨率是显微系统中最重要的参数,高分辨率数字全息显微技术是目前数字全息的主要任

收稿日期:2007-01-31;收到修改稿日期:2007-08-09

基金项目:国家自然科学基金(60577029)和北京市属市管高等学校人才强教计划资助项目。

作者简介:王华英(1963—),女,副教授,博士研究生,主要从事光学信息处理和数字全息技术方面的研究。

E-mail: pbxxyingzi@126.com

导师简介:王大勇(1968—),男,安徽人,教授,博士生导师,主要从事光学全息存储、光学信息处理方面的研究。

E-mail: wdyong@bjut.edu.cn

务<sup>[9~13]</sup>。但不同的文献<sup>[1,11,14]</sup>给出的数字全息再现像分辨率的定义和表达式通常并不一致,既有表征计算网格的像素分辨率,又有全息图的成像分辨率;另外,有些数字全息系统在被测量物体和全息图记录器件之间使用了附加的显微物镜(MO)。因此本文对无任何预放大的数字全息显微系统的成像分辨率进行分析,给出了带预放大的数字全息显微系统的成像分辨率,并进行了数值仿真和相应的实验研究,结果表明给出的数字全息显微系统的成像分辨率是合适的,对实际数字全息显微系统的优化和测量应用均有指导意义。

## 2 无预放大数字全息显微系统的成像分辨率

无预放大的数字全息显微系统是指在被测量物体和全息图记录器件之间没有任何附加的放大成像光学元件的全息记录与再现系统。常见的记录光路有两类:菲涅耳全息及无透镜傅里叶变换全息。利用无透镜傅里叶变换全息可以实现高分辨率成像<sup>[10]</sup>,其记录光路如图1所示。其中 $x_0y_0$ 平面为物平面, $xy$ 平面为全息图平面, $z$ 轴过两平面中心,记录参考光源位于物平面,记录距离为 $z_0$ 。

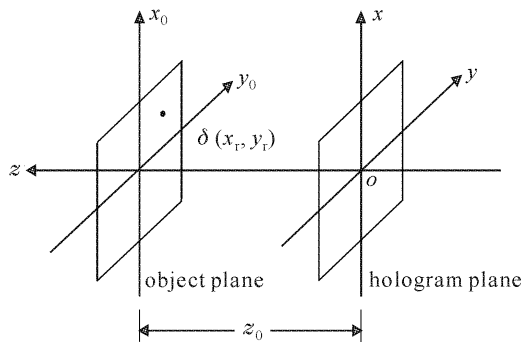


图1 无透镜傅里叶变换全息记录示意图

Fig.1 Schematic for recording off-axis lensless Fourier transform holograms

根据尼奎斯特(Nyquist)抽样定理和频谱分离条件,对记录距离 $z_0$ 和参考光源偏置的要求为<sup>[10]</sup>

$$z_0 \geq \max\left(\frac{4X}{\lambda}\Delta x, \frac{4Y}{\lambda}\Delta y\right), \quad (1)$$

$$x_r \geq \frac{3X}{2}, \quad y_r \geq \frac{3Y}{2}, \quad (2)$$

式中 $X, Y$ 为物体在水平和竖直方向的尺寸大小, $\Delta x, \Delta y$ 为 CCD 像元在水平和竖直方向的尺寸, $\lambda$ 为记录参考光波长, $(x_r, y_r)$ 为参考光源的位置坐

标。若用 $u(x, y)$ 和 $r(x, y)$ 分别表示全息图平面上的物光波和参考光波分布,则全息图强度为

$$h(x, y) = |u(x, y) + r(x, y)|^2 = |u(x, y)|^2 + |r(x, y)|^2 + u(x, y)r^*(x, y) + r(x, y)u^*(x, y), \quad (3)$$

式中 $*$ 为复共轭符号。其离散形式为

$$h(k, l) = h(x, y) \text{rect}\left(\frac{x}{N_x \Delta x}, \frac{y}{N_y \Delta y}\right) \times \sum_k \sum_l \delta(x - k \Delta x, y - l \Delta y), \quad (4)$$

式中 $k, l$ 均为整数( $-N_x/2 \leq k \leq N_x/2 - 1, -N_y/2 \leq l \leq N_y/2 - 1$ ), $N_x, N_y$ 均为 CCD 像元数,这里忽略了 CCD 像元在采样过程中的积分效应。

数字全息常见的重构算法有三种:卷积法、角谱法和菲涅耳变换法,其中卷积重构法是基于瑞利-索末菲(Rayleigh-Sommerfeld)衍射理论,角谱重构法是基于衍射的角谱理论,而非涅耳变换法则是基于菲涅耳衍射积分理论,是前两种衍射理论的傍轴近似。由全息理论,无论通过哪种方法重构,用球心位于原物平面中心的发散球面光波及球心位于其对称点的会聚球面光波再现,均可以分别得到物像比为1:1的、对称分布的原始像和共轭像<sup>[10]</sup>。

数字全息显微系统是一个特殊的相干光学成像系统,其关键在于记录,能记录的信息一定能够再现出来。由成像理论可知,像的分辨率由记录系统的数值孔径(NA)决定,在极限情况下,数字全息显微系统的点扩散函数(PSF)的一维形式为<sup>[15]</sup>

$$U_i(x_i) = C \text{sinc}\left[\frac{N_x \Delta x}{\lambda z_0}(x_i - x_0)\right], \quad (5)$$

式中 $x_0$ 为物平面上点物 $\delta(x_0)$ 的位置坐标, $x_i$ 为像平面上像点的位置坐标。因此,若不考虑物面上被分辨的两点间的相位关系对成像分辨率的影响<sup>[16]</sup>,直接运用瑞利分辨率判据于该系统,可得到在非涅耳近似下,无预放大数字全息显微系统的极限成像分辨率为

$$\Delta \delta_x = \frac{\lambda z_0}{N_x \Delta x} = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{N_x \Delta x / (2z_0)}, \quad (6)$$

式中,在小角度近似下, $N_x \Delta x / (2z_0) \approx \sin \theta$ 为全息记录系统的数值孔径,即为全息图的数值孔径, $\theta$ 为物平面中心对 CCD 靶面张开的半角。 $\Delta \delta_x$ 可认为是衍射极限分辨率,因此全息显微系统的成像分辨率由记录时全息图的数值孔径及记录光波波长决定,这与光学成像理论是一致的。若记录距离非常小或 CCD 靶面尺寸较大,导致不能使用小角度近似,即

菲涅耳衍射不成立,需要由瑞利-索末菲衍射积分或衍射的角谱理论来描述物体的衍射场,相应的重构算法为卷积法或角谱法,但再现像的分辨率仍然由记录时的数值孔径决定。因此,全息成像系统的极限分辨率的一般表达式为

$$\Delta\delta_x = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{\sin\theta} = 0.5\lambda \sqrt{\left(\frac{2z_0}{N_x\Delta x}\right)^2 + 1}, \quad (7)$$

式中,使用了  $\tan\theta = N_x\Delta x/(2z_0)$  推导  $\sin\theta$ 。

在非涅耳近似条件下文献[14]给出的全息系统成像的分辨率为

$$\Delta\delta_x = 0.61 \frac{\lambda}{\text{NA}} = 1.22 \frac{\lambda z_0}{N_x\Delta x}, \quad (8)$$

由此可推得一般情况下的分辨率应为

$$\Delta\delta_x = 0.61 \frac{\lambda}{\text{NA}} = 0.61\lambda \sqrt{\left(\frac{2z_0}{N_x\Delta x}\right)^2 + 1}, \quad (9)$$

而文献[1]和[11]给出的分辨率为

$$\Delta\delta_x = \lambda \sqrt{\left(\frac{2z_0}{N_x\Delta x}\right)^2 + 1}, \quad (10)$$

可见,式(7),(9),(10)的差异仅在于根号前的系数不同。显然,式(8)和(9)是直接把透镜成像的分辨率公式用到了数字全息显微系统上。透镜是圆形孔径,其点扩散函数的一阶零点值是  $0.61\lambda z_0/R$  ( $R$  为透镜的孔径半径)。然而,CCD 是矩形孔径,由于 CCD 作为数字全息显微系统中的一个成像光学元件,在全息图数字重构时它的孔径衍射形成的光斑也构成其相应的点扩散函数,其点扩散函数的一阶零点值为  $\lambda z_0/(N_x\Delta x)$ 。根据这个点扩散函数的一阶零点值定义 CCD 成像的分辨率,以便与 CCD 的像元尺寸区别开,因此式(8),(9)是不恰当的。式(10)是通过分析 CCD 所记录的物面上的最高空间频率得到的,但分析过程中做了近似,所得结果比式(7)大了一倍。当把菲涅耳近似条件应用于式(7)~(10)时,只有式(7)能够回到式(6),而式(6)是不容置疑的。

值得注意的是,对于菲涅耳重构算法,再现像面的像素分辨率即像面计算网格的抽样间隔为

$$\Delta x_i = \frac{\lambda z_0}{N_x\Delta x}, \quad (11)$$

而对于卷积和角谱重构算法,再现像面的像素分辨率为

$$\Delta x_i = \Delta x, \quad (12)$$

即重构的图像与记录全息图所使用的 CCD 器件具有相同的像素分辨率和图像大小。这样,卷积算法重构的图像大小就与重构距离及照明波长无关,与

菲涅耳重构算法不同。因此,卷积和角谱重构算法特别适合于准直光照明的在线全息记录,但记录的物体尺寸大于 CCD 靶面尺寸时则会产生问题,如伪像等。

对于数字全息显微系统来说,由菲涅耳重构法得到的像面像素分辨率与再现像的横向分辨率是相匹配的。

### 3 预放大数字全息显微系统的成像分辨率

预放大数字全息显微系统通常是指在 CCD 之前加入显微物镜,以此记录放大的物光波场,如图 2 所示。显微物镜首先把物体成像在 CCD 后面的  $(x_i, y_i)$  成像平面上,而实际上这个成像物光波场在到达  $(x_i, y_i)$  平面之前被 CCD 拦截了,所以这个放大的像对于 CCD 是个虚物,然后在 CCD 平面引入参考光波与成像物光波场干涉,从而记录下数字全息图。此时,CCD 与这个虚物之间的距离  $d$  为记录距离。

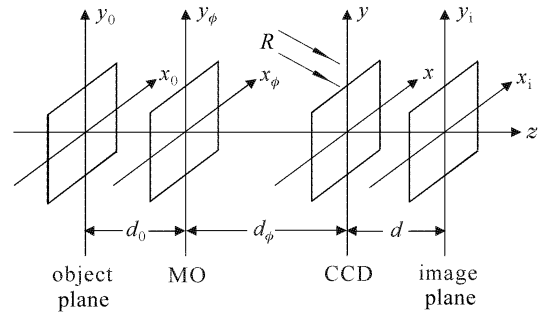


图 2 预放大离轴菲涅耳数字全息记录示意图

Fig. 2 Schematic for recording pre-magnification off-axis Fresnel digital hologram

由成像系统理论可认为该系统是一个由显微物镜放大成像及 CCD 全息记录两部分串级的系统,其总的点扩散函数为显微物镜及 CCD 两部分成像单元各自点扩散函数之间的卷积。该系统的点扩散函数的表达式(一维形式)为

$$U_i(x_i) = C \exp\left(\frac{j\pi}{\lambda d} x_i^2\right) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda d_0} \left(1 - \frac{d_i d_i}{d d_0}\right) x_0^2\right] \times \left\{ \text{sinc}\left[\frac{R}{\lambda d_i} (x_i + M x_0)\right] \times \left\{ \text{sinc}\left[\frac{N_x \Delta x}{\lambda d} (x_i + M x_0)\right] \exp\left(\frac{j\pi d_i}{\lambda d d_i} x_i^2\right) \right\} \right\}, \quad (13)$$

式中  $C$  为复常数,  $d_0$  为物平面到显微物镜的距离,

$d_\phi$  为显微物镜到 CCD 的距离,  $d_i = d_\phi + d$ , 为成像的像距,  $M = d_i/d_0$ , 为显微物镜成像的放大倍率。在二维情况下, 式(13)中的第一个 sinc 函数变为一阶贝塞耳函数, 而第二个 sinc 函数形式不变, 仅由一维变为二维。由于这里的一阶贝塞耳函数与 sinc 函数在显微物镜及 CCD 的数值孔径很大时均趋于  $\delta$  函数, 因此卷积的扩展作用不是很大。系统的成像分辨率将由显微物镜和 CCD 的参数以及记录条件共同决定。若 CCD 能够记录到的物体精细结构大于显微物镜成像所允许通过的成分, 则系统的成像分辨率取决于显微物镜的分辨率, 这是由于显微物镜所成像中已经有既定的精细结构, CCD 成像的分辨能力再高, 也无法超越这种限制。因此这种情况下系统的极限成像分辨率为

$$\Delta\xi = 0.610 \frac{\lambda}{\text{NA}}, \quad (14)$$

式中 NA 为显微物镜的数值孔径。相反, 若 CCD 所能记录到的物体精细结构比显微物镜成像所允许通过的成分少, 系统的成像分辨率将取决于 CCD 的成像分辨率。在非涅耳衍射近似情况下, 分辨率为

$$\Delta x_0 = \frac{\Delta x_i}{M} = \frac{1}{M} \cdot \frac{\lambda d}{N_x \Delta x}. \quad (15)$$

可见, 选用大数值孔径的显微物镜, 并提高像的放大倍率, 同时适当减小 CCD 的记录距离, 可以提高再现像的分辨率。

图 3(a), (b), (c) 分别为预放大数字全息系统、显微物镜以及 CCD 的点扩散函数幅值的一维分布, 其中, 模拟计算的参数为: CCD 像素数  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ , 像元尺寸  $6.8 \mu\text{m} \times 6.8 \mu\text{m}$ ; 显微物镜数值孔径 0.65,  $40\times$ , 焦距 4.87 mm, 物距  $d_0 = 4.91 \text{ mm}$ , 照明光波长  $632.8 \text{ nm}$ 。由图 3 知, 预放大数字全息系统、显微物镜和 CCD 的点扩散函数振幅曲线的第一个零点值分别为  $0.074 \text{ mm}$ ,  $0.073 \text{ mm}$  和  $0.037 \text{ mm}$ 。根据瑞利分辨率判据, 这些零点值就是相应的像面像素分辨率, 除以像的放大倍率  $M$ , 即可得到相应的成像分辨率分别为  $0.608 \mu\text{m}$ ,  $0.600 \mu\text{m}$  和  $0.304 \mu\text{m}$ 。由式(14), (15) 计算得到的结果为  $0.599 \mu\text{m}$  和  $0.299 \mu\text{m}$ 。可见, 预放大数字全息显微系统的成像分辨率很接近于显微物镜与 CCD 两者中成像分辨率中较低者。这表明了式(13)中卷积的扩展作用确实很小。对于显微物镜成像分辨率高于 CCD 成像分辨率的情况, 模拟计算得到了相同的结论。因此在预放大数字全息显微系统中, 盲目地提高显微物镜和 CCD 成像分辨率中的一

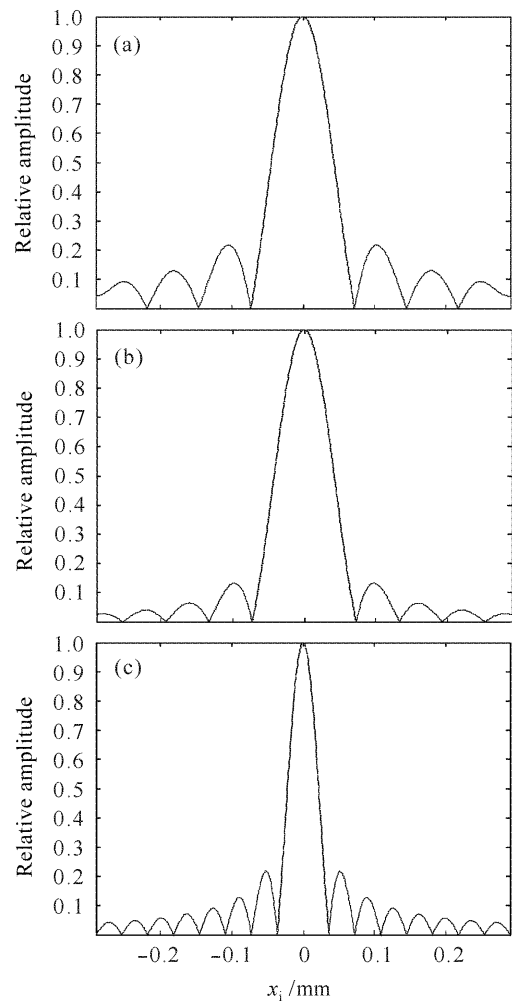


图 3 点扩散函数的中心横截面曲线

(a) 系统; (b) 显微物镜; (c) CCD

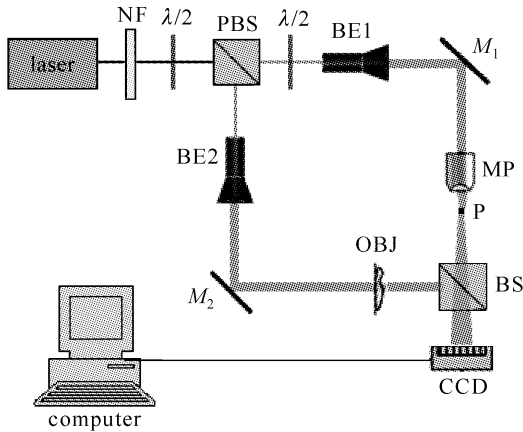
Fig. 3 Central cross section curves of PSF

(a) system; (b) MO; (c) CCD

个而忽视另一个, 对提高系统最终的成像分辨率并不一定有益。为了提高再现像的分辨率, 适当选择各部分参数, 使 CCD 成像的分辨率等于或略高于显微物镜的成像分辨率。

## 4 实验与数值仿真结果

首先, 对无预放大的数字全息显微系统完成了成像实验, 实验所用的记录系统如图 4 所示。由倍频 Nd:YAG 激光器发出的波长为  $532 \text{ nm}$  的激光经过分束器 BS1 分为两束, 分别经扩束器 BE1 和 BE2 后, 一束用来照射物体, 另一束经加有针孔的显微物镜 MP 会聚于 P 点作为记录参考点源。用于记录全息图的 CCD 具有像元数  $1317 \text{ pixel} \times 1035 \text{ pixel}$ , 像元尺寸大小  $6.8 \mu\text{m} \times 6.8 \mu\text{m}$ , 12 bit 灰度级输出。被记录物体是美国空军分辨率测试板, 成像区域大



NF: neutral filter glass;  $\lambda/2$ : half-wave plate;  
 PBS: polarized beam splitter; BE: beam expander;  
 MP: microscope objective and pinhole; BS: beam splitter

图 4 离轴无透镜傅里叶变换全息实验记录光路

Fig. 4 Experimental optical setup for recording digital off-axis lensless Fourier transform holograms

小为  $1.1 \text{ mm} \times 1.1 \text{ mm}$ , 实际记录距离  $56.9 \text{ mm}$ , 按照式(1)算出的最小记录距离为  $56.2 \text{ mm}$ , 二者非常接近。

实验所记录的全息图及再现像强度分布示于图 5, 水平方向可清晰分辨测试板的第 7.1 组, 相应的线宽为  $3.91 \mu\text{m}$ , 垂直方向可分辨测试板的第 6.6 组, 相应的线宽为  $4.38 \mu\text{m}$ . 利用式(6)计算出再现像在水平方向和垂直方向的理论极限分辨率分别为

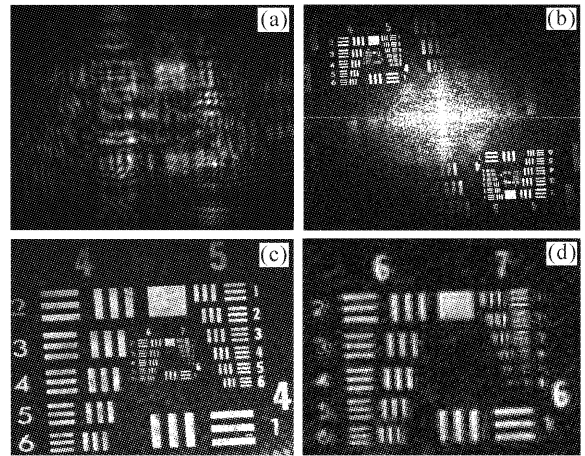


图 5

(a) 实验记录的全息图; (b) 再现像强度分布;  
 (c) (b)图左上角像的放大; (d) (c)图中心部分的放大

Fig. 5

(a) recording experimental holograms; (b) intensity distribution of reconstructed image; (c) magnification of left-up part in Fig. (b); (d) magnification of the central part in Fig. (c)

$3.40 \mu\text{m}$  和  $4.30 \mu\text{m}$ . 可见, 实验结果与理论分析结果是一致的, 即分辨率几乎已达到数字全息显微系统的衍射极限。需要指出的是, 测试板再现像的第 7.1 组中的三条竖线比实际稍短了些, 这是由于所使用的 CCD 光敏面不是正方形的, 全息图在垂直方向的数值孔径比在水平方向的要小些, 导致垂直方向分辨率较低。

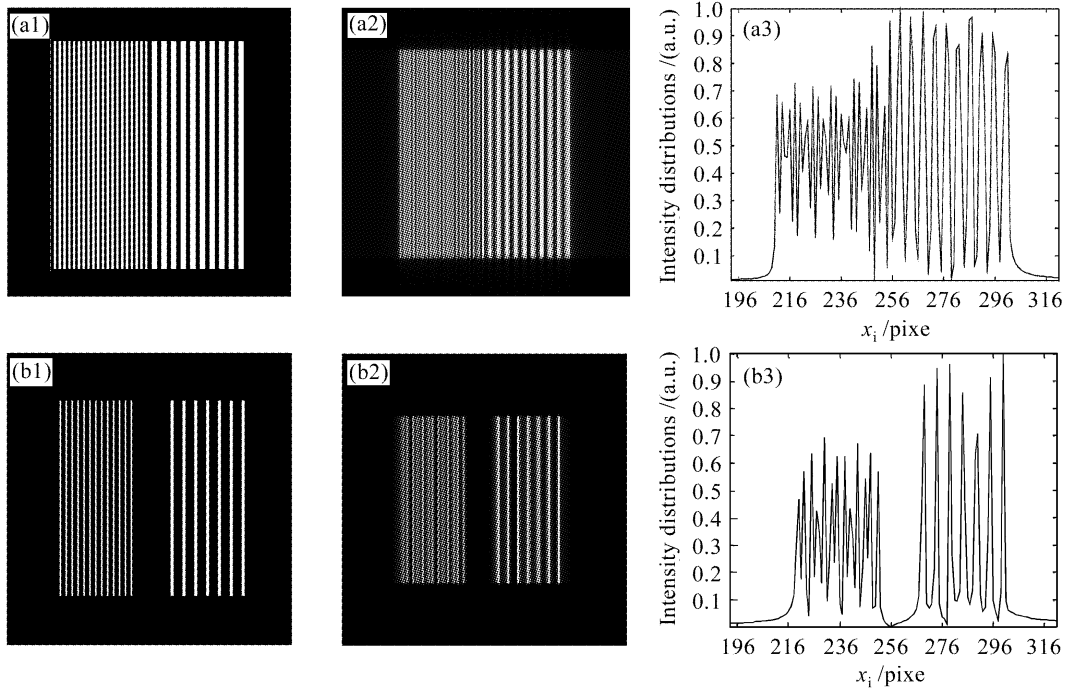


图 6 记录的条形物体(a1,b1)及其强度再现像的二维分布(a2,b2)和中心截面上的一维分布(a3,b3)

Fig. 6 Recorded strip object (a1,b1), two-dimensional intensity distribution of reconstructed image (a2,b2) and one-dimensional distribution of central cross section curve (a3,b3)

为了检验对预放大离轴菲涅耳数字全息显微系统成像分辨率的分析,对条形物体做了全息图的模拟记录和再现,如图 6 所示,除记录距离外,其他模拟参数与图 3 中数值计算时的相同。在图 6(a1)中,线条的长度为  $35\ \mu\text{m}$ ,两组线条的宽度分别为  $0.36\ \mu\text{m}$ 和 $0.72\ \mu\text{m}$ ,记录距离为  $200\ \text{mm}$ 。图 6(a2)为再现强度像的二维分布,图 6(a3)表示相应的一维强度分布。在图 6(b1)中,线条长度为  $130\ \mu\text{m}$ ,宽度分别为  $0.51\ \mu\text{m}$ 和 $1.0\ \mu\text{m}$ ,记录距离为  $505\ \text{mm}$ 。图 6(b2),(b3)分别为再现强度像的二维和一维分布。可见,在上述两种情况下,较宽的线条均被清晰再现,而较窄的线条均不能被再现。根据式(14)算得显微物镜成像的极限分辨率为  $0.59\ \mu\text{m}$ ,而由式(15)得到 CCD 成像的分辨率在上述两种情况下分别为  $0.31\ \mu\text{m}$ 和 $0.79\ \mu\text{m}$ 。由此可见,模拟结果与理论分析是一致的。

## 5 结 论

无预放大的数字全息显微系统的成像分辨率由记录时 CCD 的数值孔径和照明光波长决定。在菲涅耳近似条件下,数字全息显微系统的成像分辨率与再现像面的像素分辨率相一致,实验结果证明了分析的正确性;对于预放大数字全息显微系统,成像分辨率由显微物镜和 CCD 的参数及记录参量共同决定,即若 CCD 成像的分辨率高于显微物镜成像的分辨率,则系统最终成像的分辨率取决于显微物镜的数值孔径;反之,系统成像的分辨率取决于 CCD 的数值孔径。

## 参 考 文 献

- 1 K. Volker, J. H. Hans, W. P. O. Jptner. Application of digital holographic microscopy for inspection of micro-optical components [C]. *SPIE*, 2001, **4398**:189~198
- 2 D. Dirksen, H. Droste, B. Kemper *et al.*. Lensless Fourier holography for digital holographic interferometry on biological samples [J]. *Opt. & Laser Eng.*, 2001, **26**:241~249
- 3 T. Colomb, E. Cuche, F. Charriere *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
- 4 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
- 5 C. J. Mann, K. Kim. Quantitative phase-contrast microscopy by angular spectrum digital holography [C]. *SPIE*, 2006, **6090**:60900B-1~60900B-8
- 6 G. Udupa, B. K. A. Ngoi, H. C. Freddy Goh *et al.*. Defect detection in unpolished Si wafers by shearography [J]. *Measur. Sci. Tech.*, 2004, **15**:35~43
- 7 E. Novak. MEMS metrology techniques [C]. *SPIE*, 2005, **5716**:173~181
- 8 P. Ferraro, S. Grilli, D. Alfieri *et al.*. Extended focused image in microscopy by digital holography [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(18):6738~6749
- 9 F. C. Zhang, G. Pedrini, W. Osten. Reconstruction algorithm for high-numerical aperture holograms with diffraction-limited resolution [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(11):1633~1635
- 10 Huaying Wang, Dayong Wang, Jianjun Xie *et al.*. Recording conditions of digital holography [C]. *SPIE*, 2007, **6279**:62791J-1~62791J-10
- 11 Fan Qi, Zhao Jianlin, Li Shiyang *et al.*. Detail displaying and vision aberration rectifying of reconstructed image in digital holography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10):1401~1405
- 12 范琦,赵建林,李世扬等. 数字全息再现像的细节显示和视觉畸变矫正[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10):1401~1405
- 13 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu *et al.*. Some quantitative analysis about digital holographic reconstructed image [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5):570~574
- 14 钟丽云,张以谟,吕晓旭等. 数字全息再现像的分析计算[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5):570~574
- 15 Lei Xu, Xiaoyuan Peng, Zhixiong Guo *et al.*. Imaging analysis of digital holographys [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(7):2444~2451
- 16 Fucai Zhang, G. Pedrini, W. Osten. Aberration free reconstruction algorithm for high numerical aperture digital hologram [C]. *SPIE*, 2006, **6188**:618814-1~618814-8
- 17 Chengshan Guo, Li Zhang, Zhenyu Rong *et al.*. Effect of the fill factor of CCD pixels on digital holograms [J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(9):2768~2771
- 18 J. W. Goodman, Qin Kecheng, Liu Peisen, Chen Jiabi *et al.* trans.. Introduction to Fourier Optics [M]. Third edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 141~143
- 19 J. W. Goodman 著,秦克诚,刘培森,陈家璧等译. 傅里叶光学导论[M]. 第3版. 北京:电子工业出版社, 2006. 141~143