

## 利用小尺寸电荷耦合器件实现数字全息高分辨成像\*

王华英<sup>1)†</sup> 于梦杰<sup>2)</sup> 江亚男<sup>3)</sup> 宋修法<sup>1)</sup> 朱巧芬<sup>1)</sup> 刘飞飞<sup>2)</sup>

1) (河北工程大学理学院, 邯郸 056038)

2) (河北工程大学信息与电气工程学院, 邯郸 056038)

3) (北京理工大学自动化学院, 海淀 100081)

(2013年8月15日收到; 2013年10月6日收到修改稿)

为了在降低数字全息显微成像系统成本的同时实现高分辨成像, 对像面数字全息显微术的记录与再现过程进行了理论分析, 结合系统的点扩散函数, 对该系统的横向分辨率进行了分析. 得到了如下结论: 像面数字全息显微系统的横向分辨率对电荷耦合器件 (CCD) 光敏面尺寸变化不敏感; 对于常见的 CCD 器件, 其像元尺寸的变化对该系统的横向分辨率影响甚微. 此外, 对像面数字全息显微系统的成像特点进行了分析, 结果表明: 利用像面数字全息系统可以实现物体信息的完整记录与再现, 其成像分辨率及像质优于预放大数字全息系统. 利用搭建的数字全息实验记录系统, 从强度及位相两方面对理论分析结果进行了验证, 实验结果表明了理论分析的正确性.

**关键词:** 像面数字全息术, 横向分辨率, 点扩散函数, 小尺寸电荷耦合器件

**PACS:** 42.30.Kq, 42.40.Kw, 42.30.-d

**DOI:** 10.7498/aps.62.244203

## 1 引言

数字全息显微术是一种全新的成像与测量技术<sup>[1]</sup>, 它实现了光学、光电转换技术、计算机技术的高度融合, 是一种全场的、非接触的、准实时三维成像技术. 利用该技术可以同时获得物体的强度及位相分布, 并可以灵活地进行存储、传输、滤波、自动聚焦、位相畸变补偿及多视角显示等. 上述优点表明数字全息显微术具有广泛的应用前景<sup>[2-5]</sup>. 但受到记录器件 (如电荷耦合器件 (CCD), CMOS) 有限的光敏面尺寸及像元尺寸的限制, 数字全息显微成像的分辨率还不够高, 这在很大程度上影响了数字全息显微技术的进一步发展及应用. 如何提高数字全息显微系统的成像分辨率仍是当前国际研究的热点问题.

为了提高数字全息显微系统的成像分辨率, 已提出了多种数字全息超分辨率成像技术<sup>[6-10]</sup>. 如 Liu 等<sup>[6]</sup> 通过在物体与 CCD 之间插入衍射光

栅得到了最为典型的超分辨率成像方法; 意大利的 Granero 等<sup>[7,8]</sup> 实现了超分辨率技术与相移技术的结合, 该方法虽然提高了再现像质量和成像分辨率, 但不能应用到实时显微成像中. 为了克服 CCD 光敏面尺寸小、空间分辨率低的弱点, 数字全息合成孔径的成像方法<sup>[11-13]</sup> 也得到了较多的研究, 如微调照明物光方向记录多幅全息图的方法<sup>[11]</sup>、移动 CCD 记录多幅全息图的方法<sup>[12]</sup>, 但这些方法的实时性太差, 不能实现活细胞的动态测量; 利用多个记录器件同时记录多幅全息图<sup>[13]</sup>, 解决了实时性的问题, 但再现过程困难同时又引入了图像融合带来的位相误差. 总之, 基于合成孔径技术的数字全息显微术<sup>[14]</sup>, 在提高成像分辨率的同时却增加了物体记录与再现方面的复杂性.

预放大数字全息显微系统是数字全息显微中最常用的光路系统, 由于 CCD 记录的是经显微物镜放大的精细结构, 因而可以实现高分辨成像. 该系统的成像分辨率与 CCD 光敏面尺寸有关<sup>[15]</sup>. 像面数字全息显微术是预放大数字全息显微术中一

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61077001, 61144005)、河北省自然科学基金 (批准号: F2010001038, F2012402051, F2012402028) 和河北省科技支撑计划 (批准号: 09277101D, 13210201D) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: pbxsyngzi@126.com

种极为特殊的情况, 理论研究表明, 与预放大数字全息显微系统相比, 像面数字全息显微系统不仅再现过程简单、快速、对光源相干性要求低, 而且其成像分辨率优于预放大数字全息显微系统的成像分辨率<sup>[16]</sup>. 更为重要的是, 近期我们研究发现, 像面数字全息系统的成像分辨率与 CCD 的光敏面尺寸关系不大, 因此, 利用小尺寸 CCD 即可实现高分辨率成像, 这对于降低数字全息显微系统的成本具有重要的意义. 本文在对像面数字全息显微系统记录与再现过程进行分析的基础上, 结合对系统点扩散函数的讨论, 对该系统的成像分辨率决定因素进行了分析, 最后通过实验结果加以验证.

## 2 像面数字全息显微术

### 2.1 像面数字全息图的记录

图 1 所示为平面参考光像面数字全息术的记录系统及所建立的坐标系示意图, 其中显微物镜 (MO) 已用单透镜等效代替,  $x_0$ - $y_0$ ,  $x_\phi$ - $y_\phi$ ,  $x$ - $y$  依次表示物平面、透镜平面、CCD 记录平面 (也是 MO 的像平面),  $d_0$  表示物平面与显微物镜所在平面之间的距离,  $d_i$  表示透镜所在平面与 CCD 记录平面之间的距离, 并且  $d_0$  与  $d_i$  满足如下关系:

$$\frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

其中  $f$  为显微物镜的焦距.

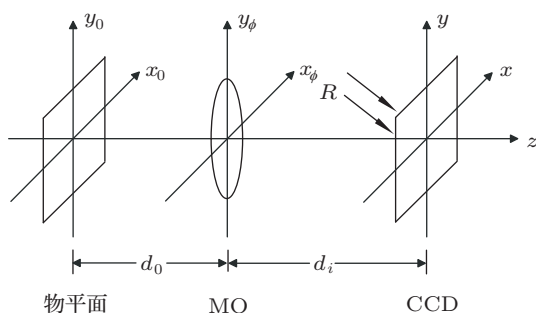


图 1 平面参考光像面数字全息坐标系示意图

设  $O(x_0, y_0)$  表示物光波的复振幅分布, 根据菲涅耳衍射公式, 且忽略无关紧要的常数项因子, 可知传播到透镜前表面的物光波复振幅如下式所示:

$$O'(x_\phi, y_\phi) = \iint_{\infty} O(x_0, y_0) \exp \left\{ \frac{jk}{2d_0} \left[ (x_\phi - x_0)^2 + (y_\phi - y_0)^2 \right] \right\} dx_0 dy_0, \quad (2)$$

其中,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  为波数,  $\lambda$  表示激光的波长.

根据透镜的傅里叶变换性质可知, 传播到透镜后表面的物光波复振幅分布为

$$O(x_\phi, y_\phi) = \exp \left[ -\frac{jk}{2f} (x_\phi^2 + y_\phi^2) \right] \times P(x_\phi, y_\phi) O'(x_\phi, y_\phi), \quad (3)$$

其中,  $P(x_\phi, y_\phi) = \text{circ} \left( \sqrt{x_\phi^2 + y_\phi^2} / R \right)$  是透镜的孔径函数,  $R$  为 MO 的孔径半径.

同样, 可得到物光波在 CCD 平面的复振幅分布为

$$O(x, y) = \iint_{\infty} O(x_\phi, y_\phi) \exp \left\{ \frac{jk}{2d_i} \left[ (x - x_\phi)^2 + (y - y_\phi)^2 \right] \right\} dx_\phi dy_\phi, \quad (4)$$

同理, 参考光在 CCD 平面的复振幅分布可以表示为

$$R(x, y) = R_0 \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)], \quad (5)$$

式中,  $R_0$  表示参考光波的振幅分布,  $f_x, f_y$  表示平面参考光在  $x, y$  方向的空间频率. CCD 平面的连续干涉场强度分布为

$$H(x, y) = |O(x, y) + R(x, y)|^2 = |O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 + O(x, y)R^*(x, y) + O^*(x, y)R(x, y), \quad (6)$$

其中  $R^*(x, y), O^*(x, y)$  分别表示参考光波、物光波的复共轭光波. CCD 记录的数字全息图为<sup>[17]</sup>

$$H_D(x, y) = \left[ H(x, y) \otimes \text{rect} \left( \frac{x}{\alpha \Delta x}, \frac{y}{\beta \Delta y} \right) \right] \times \text{comb} \left( \frac{x}{\Delta x}, \frac{y}{\Delta y} \right) \text{rect} \left( \frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y} \right). \quad (7)$$

式中符号“ $\otimes$ ”表示卷积运算, 描述 CCD 像元对光场强度的平均效应;  $\alpha, \beta$  为 CCD 的填充因子, 且  $(\alpha, \beta) \in (0, 1]$  (通常接近于 1);  $\Delta x, \Delta y$  和  $L_x, L_y$  分别表示 CCD 沿  $x, y$  方向的像元尺寸及光敏面尺寸.

### 2.2 像面数字全息的再现

数字全息的再现过程是通过计算机模拟光波的衍射过程实现的. 对于像面数字全息术, 采用准直光波  $C(x, y) = 1$  照射全息图, 即可得到物体清晰的再现像. 通常, 为了消除再现像中零级像和负一级像的干扰, 必须对全息图的频谱进行滤波处理.

像面数字全息图再现时, 由于无须衍射传播计算, 因此得到如下的原始像光场复振幅分布:

$$U_{+1}(x, y) = \text{FT}^{-1} \{ \text{FT} [H_D(x, y)] W_{+1}(f_x, f_y) \}, \quad (8)$$

其中,  $\text{FT}$  和  $\text{FT}^{-1}$  分别表示二维傅里叶变换及其逆变换,  $W_{+1}(f_x, f_y)$  为频域滤波透明窗函数. 可见, 像面数字全息的再现过程实质上是从所记录的数字全息图频谱中滤出 +1 级谱, 然后再对其进行逆傅里叶变换即可. 由 (7) 式, 数字全息图的频谱分布如下:

$$\begin{aligned} & \text{FT} [H_D(x, y)] \\ &= \left\{ \text{FT} [H(x, y)] \cdot \text{FT} \left[ \text{rect} \left( \frac{x}{\alpha \Delta x}, \frac{y}{\beta \Delta y} \right) \right] \right\} \\ & \otimes \text{FT} \left\{ \text{comb} \left( \frac{x}{\Delta x}, \frac{y}{\Delta y} \right) \text{rect} \left( \frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y} \right) \right\} \\ &= C \{ \text{FT} [H(x, y)] \cdot \text{sinc}(\alpha \Delta x f_x) \text{sinc}(\beta \Delta y f_y) \} \\ & \otimes \sum_{m, n} \text{sinc} \left[ L_x \left( f_x - \frac{m}{\Delta x} \right) \right] \\ & \quad \times \text{sinc} \left[ L_y \left( f_y - \frac{n}{\Delta y} \right) \right], \quad (9) \end{aligned}$$

其中  $C = \alpha \Delta x \beta \Delta y L_x L_y$  为常数,  $-M/2 \leq m \leq M/2 - 1$ ,  $-N/2 \leq n \leq N/2 - 1$ ,  $M, N$  为 CCD 在  $x, y$  方向的像素数.

### 3 像面数字全息系统的成像特点分析

#### 3.1 横向分辨率分析

理论上, (6) 式表示的连续全息图函数  $H(x, y)$  在空间上是无限宽的, 因而其频谱函数  $\text{FT}[H(x, y)]$  宽度是有限的. (9) 式中第一个  $\text{sinc}$  函数沿  $x$  方向的主瓣半宽为  $1/(\alpha \Delta x)$ ,  $\alpha \Delta x$  很小, 因而其主瓣很宽, 该函数的作用是降低全息图频谱中高频成分的比重, 即降低系统成像的横向分辨率. 对于目前常见的数字全息显微系统及 CCD 器件来说,  $\text{sinc}(\alpha \Delta x f_x)$  对全息图高频成分比重的降低作用很小. 通常, CCD 的填充因子大于 0.9, 因此在下面的分析中, 我们将忽略  $\alpha \Delta x$  与  $\Delta x$  的差异. 由此得到结论: 在其他条件完全相同的情况下, 减小 CCD 像元的尺寸, 可使系统的成像分辨率略有提高. 第二个  $\text{sinc}$  函数沿  $x$  方向的主瓣半宽是  $1/L_x$ , 是一个窄带函数, 其作用是展宽全息图的频谱, 而且 CCD 光敏面尺寸越小, 零级及正、负一级谱扩展越厉害, 这

样越容易造成透明滤波窗口外的高频成分增多, 从而降低系统成像的分辨率. 然而, 我们可以在数值再现过程中尽量增大透明滤波窗口的大小, 从而尽可能避免高频信息的丢失. 也就是说, 对于像面数字全息来说, 在正确抽样的条件下, CCD 光敏面尺寸大小对系统的横向分辨率影响不大.

以上仅仅分析了 CCD 参数对横向分辨率的影响, 但我们知道, 像面数字全息图记录的是 MO 对样品所成的像光场, 因而 MO 单元的成像分辨率大小对整个系统的成像分辨率有至关重要的影响. 根据文献 [18], 若频域滤波能将再现光波场的 +1 谱完全滤出, 则对于位于物平面原点处的单位振幅物点来说, 所形成的实原始像光场的复振幅分布, 即像面数字全息系统的点扩散函数 (PSF) 如下:

$$\begin{aligned} & \text{PSF}_{+1}(x, y) \\ &= C \left\{ \exp \left[ \frac{j k}{2 d_i} (x^2 + y^2) \right] \right. \\ & \quad \times \exp [j 2 \pi (f_x x + f_y y)] \left. \frac{J_1 [2 \pi R \rho]}{R \rho} \right\} \\ & \quad \otimes \text{rect} \left( \frac{x}{\alpha \Delta x}, \frac{y}{\beta \Delta y} \right) \otimes \text{comb} \left( \frac{x}{\Delta x}, \frac{y}{\Delta y} \right) \\ & \quad \times \text{rect} \left( \frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y} \right), \quad (10) \end{aligned}$$

其中  $C$  为常数,  $\exp [j 2 \pi (f_x x + f_y y)]$  为记录参考光波的共轭复振幅,  $J_1$  为一阶贝塞尔函数,  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2} / (\lambda d_i)$ .

(10) 式中的两个指数函数的作用仅仅是对 PSF 函数的位相起调制作用, 并不影响系统振幅点扩散函数的宽度; 函数  $J_1 [2 \pi R \rho] / (R \rho)$  的主瓣半宽由激光波长及 MO 的数值孔径大小决定, 且其值理论极限为  $\delta = 0.61 \lambda / NA$ ; 式中卷积运算的作用反映了 CCD 有效像元对光波场强度的平均效应, 起到展宽  $J_1 [2 \pi R \rho] / (R \rho)$  曲线宽度的作用;  $\text{comb}()$  函数的作用是离散抽样, 其对系统 PSF 振幅曲线主瓣宽度的影响取决于 CCD 像元的大小, 但该影响甚微 [18]; 对于显微成像, 函数  $J_1 [2 \pi R \rho] / (R \rho)$  的主瓣半宽远小于  $\text{rect}(x/L_x, y/L_y)$  的半宽, 同时考虑到 CCD 像元对光波场强度的平均效应带来的展宽作用不是很大 [18], 因而函数  $\text{rect}(x/L_x, y/L_y)$  的作用只是限制 CCD 记录的光波场范围, 因而在高倍率放大成像的情况下, 记录器件的横向尺寸大小对系统 PSF 振幅曲线的主瓣半宽影响很小.

根据瑞利判据, 光学系统成像的横向分辨率等

于该系统振幅点扩散函数主瓣宽度的一半<sup>[19]</sup>. 我们知道, 对于菲涅耳和无透镜傅里叶变换数字全息术, 通过增大 CCD 光敏面尺寸可以显著提高系统的横向分辨率; 对于预放大数字全息术, 在其他条件一定的情况下, 增大 CCD 光敏面尺寸也可以改进系统的横向分辨率<sup>[15]</sup>. 然而综合上述分析可以得到如下结论: 像面数字全息显微系统的横向分辨率主要取决于所用激光波长、MO 的数值孔径, CCD 光敏面尺寸大小对系统成像分辨率影响很小, 常规 CCD 像元大小的不同对系统成像分辨率的影响也不大. 显然, 所用激光波长越短、MO 的数值孔径越大, 系统成像的分辨率越高. 然而, 试图通过增大记录器件尺寸来提高像面数字全息系统的成像分辨率, 效果甚微. 同时, 从相反的角度我们可以得出结论: 利用小尺寸 CCD 即能实现数字全息高分辨率成像.

对于球面参考光像面数字全息系统, 可以得到与 (10) 式非常相似的结果, 只是函数  $J_1 [2\pi R\rho]/(R\rho)$  前的指数函数系数有所不同, 因此上述结论对该种系统也是成立的.

由于 CCD 位于 MO 的像面位置, 所以 CCD 在  $x, y$  方向上可记录的物体尺寸  $L_{ox}, L_{oy}$  与其光敏面尺寸  $L_x, L_y$  及像的放大倍数  $M$  之间存在如下制约关系:

$$L_{ox} \leq \frac{L_x}{M}, \quad L_{oy} \leq \frac{L_y}{M}. \quad (11)$$

### 3.2 成像特点分析

为了形象直观地对像面及预放大数字全息系统之间的差异进行说明, 利用如图 2 所示的几何光学光路做进一步的分析.

在图 2 中, 显微物镜 MO 的物平面、焦平面及像平面分别用“Object”, “Focal plane”及“Image”表示, 这些平面均与纸面垂直,  $z$  轴穿过 MO 的光心并与以上各平面垂直. 垂直于光轴的物体置于物平面, CCD 的光敏面尺寸  $L_x = DE$ . 若在光路中加入参考光波, 即可实现数字全息图的记录. 根据几何光学原理, 分别给出了物面上  $A, B, C$  三点发出的四条特殊光线及其折射光线 (包括投射到 MO 边缘  $M, S$  点的光线), 其中  $A', B', C'$  分别是  $A, B, C$  的共轭像点. 由图 2 可知, 对于像面数字全息术, CCD 置于 MO 的像平面, 此时系统的视场大小为物面  $A, B$  之间的距离. 若将 CCD 远离像平面并向着 MO 的方

向移动, 即为预放大数字全息术. 显而易见, 预放大数字全息术 (如 CCD 位于  $DE$  时) 所能记录的物体范围要大于 CCD 位于像面时所能记录的范围. 然而, 这并不表明预放大数字全息系统比像面数字全息系统的成像性能优越. 证明如下.

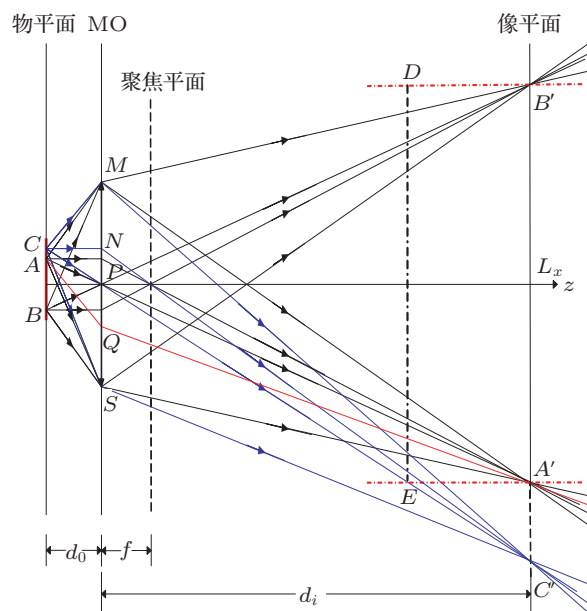


图 2 透镜成像光路及空间频率分析示意图

我们知道, 在光波的衍射传播过程中, 相对于主光轴而言, 衍射角越大, 此光束相应的空间频率也较高. 因此, 做线段  $AQ$ , 使  $\triangle APQ \cong \triangle CNM$  ( $QA'$  为与  $AQ$  相应的折射光线). 根据对称关系可知, 沿  $AQ$  与  $CM$  方向传播的光波具有相同的空间频率. 当 CCD 位于  $DE$  位置时, 它可记录的视场边缘点 ( $C$  点) 的最高空间频率为与沿  $CM$  方向传播的光波相应的空间频率; 而当 CCD 位于像面位置时, 它能够记录的视场边缘点 ( $A$  点) 的最高空间频率为与沿  $AS$  方向传播的光波相应的空间频率. 显然, 该频率高于与沿  $AQ$  (也即  $CM$ ) 方向传播的光波的空间频率. 对于两种系统所共有的视场中心部分, 所记录的物体空间频率是相同的. 但就整个视场而言, 预放大数字全息系统所能记录的最高空间频率 (高于沿  $AS$ , 低于沿  $CS$  传播的光波频率) 比像面数字全息系统所能记录的最高空间频率 (沿  $AS$  方向传播的光波频率) 略微高一些, 但这个差异非常非常小. 考虑到预放大数字全息系统的成像分辨率随着全息图记录距离的增大而降低及像面数字全息系统是预放大数字全息系统在记录距离为零时的极

限情况,可以得到结论:在其他条件相同的情况下,像面数字全息术成像的分辨率高于预放大数字全息术.

从图 2 中还可以看出,当 CCD 位于像面位置时,由  $A, B$  之间各点发出的且通过 MO 的所有空间频率的光波均能被 CCD 记录,而位于  $A, B$  之外的各点发出的且通过 MO 的各种空间频率的光波均不能被 CCD 记录.也就是说,像面数字全息图对于物体信息的记录是完整的;而当 CCD 位于像面位置之外时,其所记录的物体区域中边缘点发出的通过 MO 的部分高频信息没有被记录下来,也就是说,对于这些点的信息记录不是完整的,这将造成这些点的高频信息的丢失,从而使边缘点的成像分辨率降低.而且 CCD 离开像面位置越远,边缘点高频信息的丢失越严重.因此,像面数字全息系统的成像分辨率及成像质量均优于预放大数字全息成像系统.

上述结论也可从成像系统的空间带宽积角度分析得到.数字全息系统是一个线性空不变系统,在光波传播过程中,系统的空间带宽积是不变的.由图 2,当 CCD 位于系统的像面位置时,所能记录的物体区域最小,因而此时通过系统的频带宽度是最大的,即此时 CCD 能记录到最高的空间频率成分.随着 CCD 离开像面的位置越远,其所记录的物体区域越大,而所记录的空间频率却越低,成像分辨率也就越低.这与之前我们利用其他方法得到的结论“预放大数字全息中,在其他条件一定的情况下,随着全息图记录距离的增大,系统的成像分辨率逐渐降低”是完全一致的.

此外,由图 2 还可以看出,由于显微成像的放大率比较高,因此,当 CCD 尺寸有较大增加时,其能够记录的物体尺寸增加很小,从而导致所记录的最高空间频率随 CCD 尺寸的增大略有增大.如图所示,若 CCD 的横向尺寸增加  $A'C'$ ,则相应的视场增大  $AC$ ,所记录的最高空间频率则由  $AS$  光束相应的空间频率变为由光束  $CS$  相应的空间频率,而二者之间的频率差异是很小的.事实上,显微成像的放大倍率远比图中显示的放大倍率大.因此,得到结论:像面数字全息系统的成像分辨率对 CCD 尺寸的变化不敏感.

#### 4 实验结果与分析

利用图 3 所示的平面参考光像面数字全息记

录系统进行显微成像的实验研究.由 He-Ne 激光器发出的波长为 632.8 nm 的激光,经分光棱镜 PBS 后分为两束光,且两束光在分别经相同的扩束-准直-滤波系统后,一束用来照射物体,并通过 MO 将样品放大,形成物光波.另一束直接作为参考光,两束光通过棱镜 BS 进行合束并产生干涉,形成连续的干涉光波场,由位于像平面的光电耦合器件 CCD 进行抽样及离散,形成数字全息图,然后送入计算机进行数值再现.实验中采用的 MO 的参数规格为:放大倍数为 40,数值孔径为 0.65,焦距为 4.65 mm,此 MO 的理论极限分辨率为  $0.59 \mu\text{m}$ ; CCD 的参数规格为:像素尺寸为  $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ ,像素数为  $1392 \times 1032$ ,16 bit 级灰度输出.实验中采用美国空军分辨率测试板为研究对象,利用同一个 CCD 分别记录大小不同的全息图,然后进行再现及对比研究.

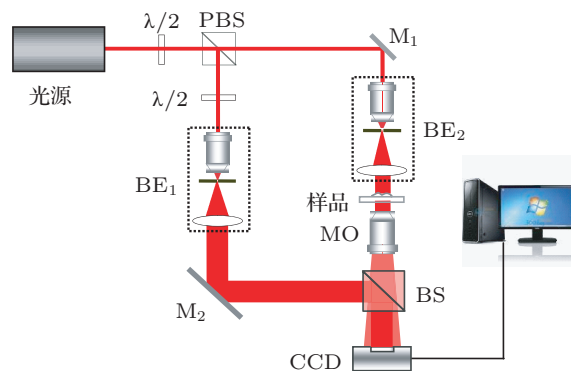


图 3 平面参考光像面数字全息记录光路示意图

图 4 是利用图 3 所示实验光路对 USAF1951 进行实验得到的结果.其中图 4(a), (e), (i), (m)(第一列)为所记录的不同尺寸的数字全息图,相应的像素数分别为  $1392 \times 1032$ ,  $1024 \times 1024$ ,  $512 \times 512$  和  $256 \times 256$ ;图 4(b), (f), (j), (n)(第二列)分别是相应的全息图频谱分布;图 4(c), (j), (k), (o)(第三列)是再现得到的像强度分布;最后一列是相应的白色方框中的放大像及后三种情况下 9.3 组线条再现像强度的一维分布.通过比较 (d), (h), (l), (o) 可见,分辨率板 9.3 组(线条宽度为  $0.78 \mu\text{m}$ )的信息均可被清晰再现,而且四幅图的像质没有明显差异,这表明:1) 所搭建系统的成像分辨率远高于  $0.78 \mu\text{m}$ ;2) 在其他条件相同的情况下,像面数字全息系统的成像分辨率与 CCD 光敏面尺寸大小关系不大.同时也表明:利用小尺寸 CCD 记录的像面数字全息图完全可以实现高分辨率成像.

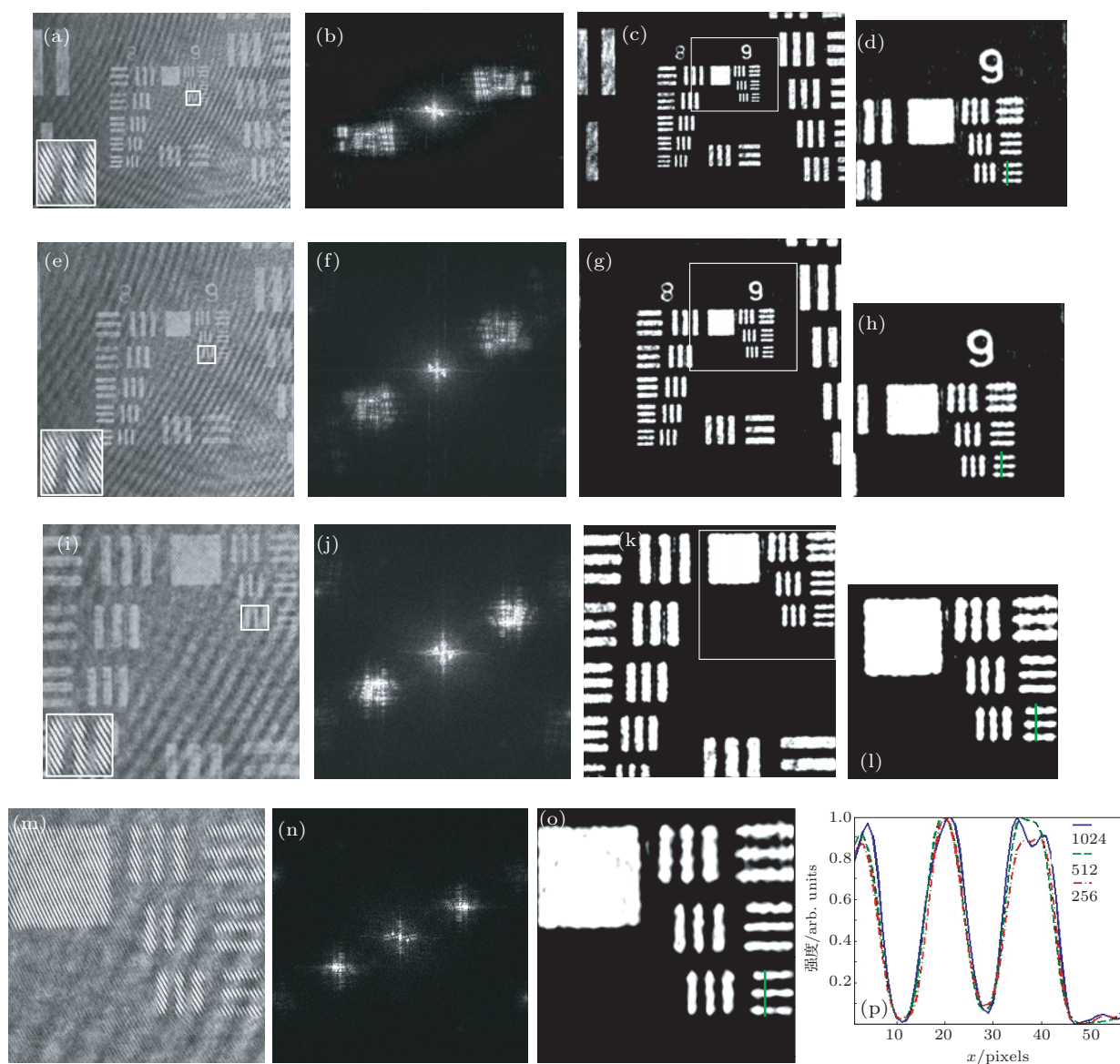


图 4 平面参考光像面数字全息实验结果 (a), (e), (i), (m) 为全息图 (大小分别为  $1392 \times 1032$ ,  $1024 \times 1024$ ,  $512 \times 512$  和  $256 \times 256$ ); (b), (f), (j), (n) 为图 (a), (e), (i), (m) 的频谱; (c), (g), (k), (o) 为强度再现像; (d), (h), (l) 白色线框内的放大图; (p) 为图 (g), (k), (o) 中线条上的一维分布

为了进一步验证对于位相重建是否有同样的结论, 我们利用球面参考光像面数字全息记录光路对人体血红细胞进行记录与再现, 结果如图 5 所示. 其中, 图 5(a)—(d) 分别是所记录的全息图 (大小为  $1392 \times 1032$ )、全息图频谱、再现的二维位相部分放大图及其三维显示, 图 5(e) 是 (c) 中白色圆环内细胞的三维位相放大图. 实验记录参数:  $d_0 = 4.74 \text{ mm}$ ,  $d_i = 241.26 \text{ mm}$ ,  $M = 50.9$ . 从图中可以清楚地看出细胞的形态, 获得细胞大小, 如图 5(e) 中细胞直径约为  $7 \mu\text{m}$ , 这与用其他方法得到的结果是一致的.

图 6(a) 为由图 5(a) 中心部分截取  $512 \times 512$  后

的结果, 图 6(b)—(e) 分别是图 6(a) 的频谱分布、再现位相的二维及三维分布. 比较图 5(d), (e) 与图 6(d), (e), 可见全息图裁剪后再现得到的位相像的分辨率和图像质量变化甚微.

为了研究像面数字全息系统的横向分辨率随 CCD 像元大小的变化情况, 在上述分辨率板实验中, 换用  $10\times$ ,  $NA = 0.25$  的 MO 重新进行实验, 该 MO 的理论极限分辨率为  $1.51 \mu\text{m}$ , 实验结果如图 7 所示. 其中, 图 7(a), (b), (c) 分别是大小为  $1024 \times 1024$  的原始全息图、全息图频谱及强度再现像, 图 7(d) 是图 7(c) 的中心放大. 通过对相邻像素值取平均的方法将图 7(a) 转化为像素

数为  $512 \times 512$  的全息图, 此新全息图像元大小为  $9.30 \mu\text{m} \times 9.30 \mu\text{m}$ , 但全息图大小没有发生变化, 如图 7(e) 所示. 图 7(f), (g), (h) 是图 (e) 的频谱及强度

再现像. 需要说明的是, 原频谱图中正、负一级谱发生了折叠, 为了保证它们的完整性, 因而做了频移. 比较图 7(c), (g) 及图 7(d), (h) 可见, 对于分辨率

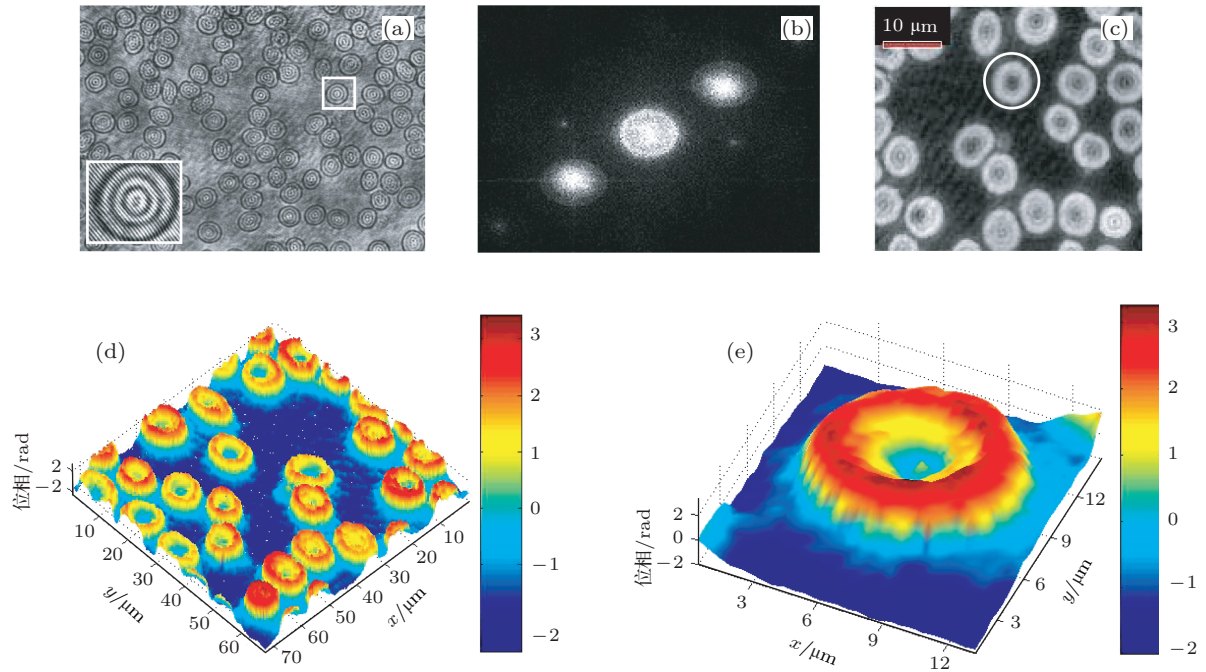


图 5 球面参考光像面 DHM 对人体红细胞的实验结果 (a) 全息图; (b) 全息图频谱; (c) 二维位相分布的部分放大图; (d) 图 5(c) 的三维显示; (e) 图 5(c) 中白色圆环内细胞的三维放大图

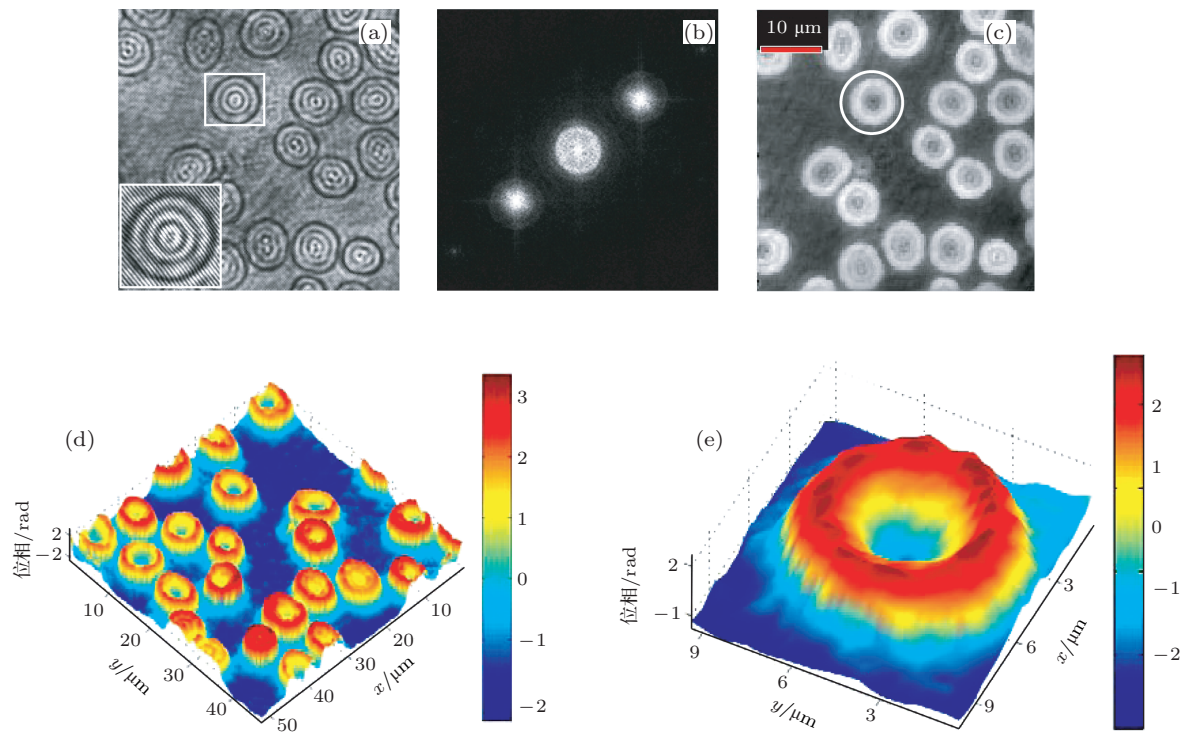


图 6 裁剪后的全息图及其再现结果 (a) 裁剪后的全息图; (b) 全息图频谱; (c) 二维位相分布的部分放大图; (d) 图 6(c) 的三维显示; (e) 图 6(c) 中白色圆环内细胞的三维放大图

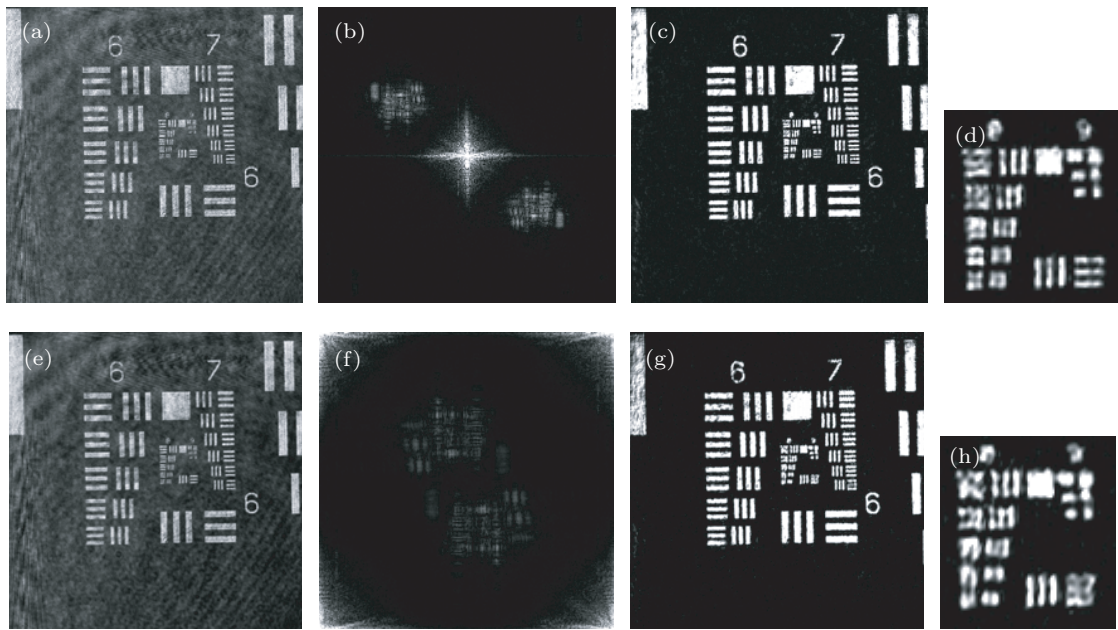


图7 平面参考光像面数字全息实验结果 (a), (b), (c), (d) 原始全息图、全息图频谱、强度再现像及其中心放大; (e), (f), (g), (h) 经像素值平均后的全息图及相应的结果

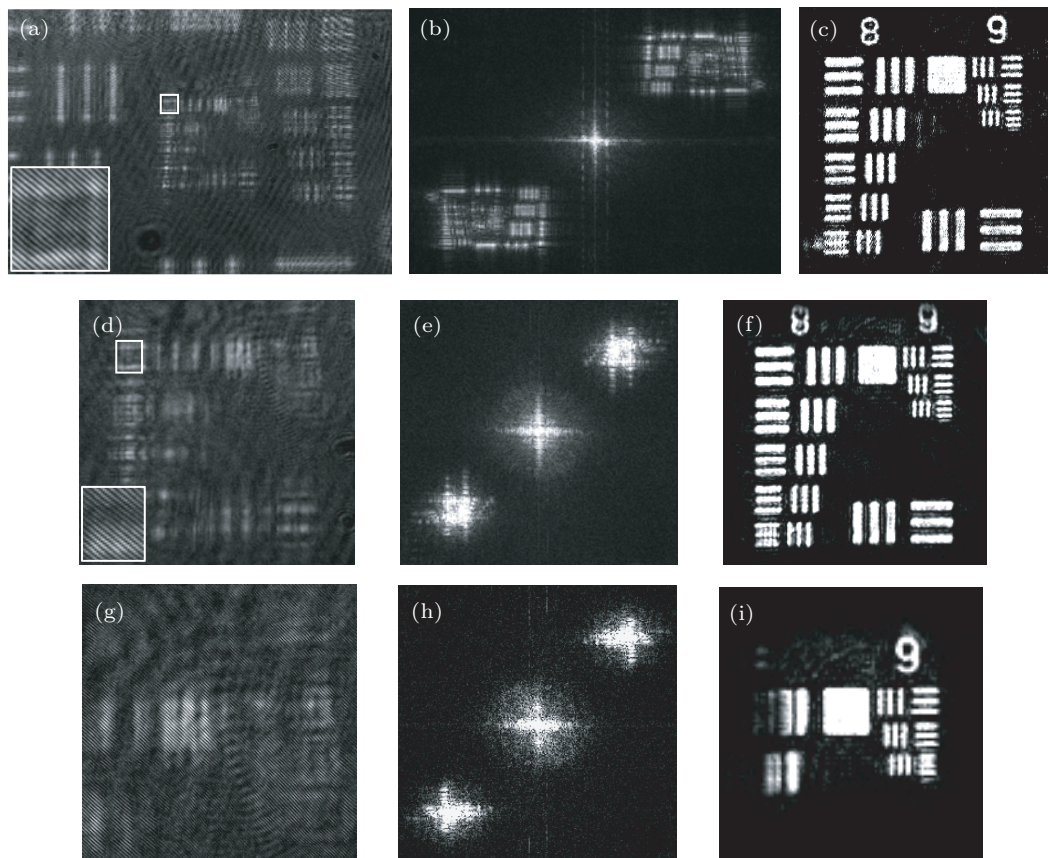


图8 平面参考光预放大数字全息实验结果 (a) 原始全息图; (b) 图(a)的频谱; (c) 再现强度像的中心部分放大图; (d) 大小为 $512 \times 512$ 的全息图; (e) 图(d)的频谱; (f) 由图(d)得到的强度像; (g) 大小为 $256 \times 256$ 的全息图; (h) 图(g)的频谱; (i) 由图(g)得到的强度像

板中线条宽度大于 7.6 组 (线宽  $2.19 \mu\text{m}$ ) 的部分, 两种情况下再现像清晰度差异很小; 而对于线条宽度小于 8.1 组 (线宽  $1.95 \mu\text{m}$ ) 的高频部分, 大像元情

况下的再现像清晰度有所降低. 但考虑到数字全息显微中通常所用的 CCD 像元尺寸都比较小 (尺寸接近于  $10 \mu\text{m}$  的 CCD 目前很少使用), 可以得到如



下结论: 对物体中尺寸大于  $MO$  极限分辨率的精细结构, CCD 像元尺寸大小对像面数字全息系统的成像分辨率影响甚微; 而对于物体中尺寸小于  $MO$  极限分辨率的精细结构, 随着 CCD 像元尺寸的增大, 系统的成像分辨率有所降低, 但通常情况下这种降低作用不明显. 这与上述理论分析结果是相一致的.

作为比较, 下面研究预放大数字全息系统的分辨率与 CCD 记录尺寸大小之间的关系. 在图 3 所示的光路中, 保持其他条件不变, 将 CCD 移离像面的位置记录全息图, 即可得到预放大数字全息图. 图 8(a), (b), (c) 为所记录的全息图、全息图频谱及再现强度像的中心部分, 其中全息图大小为  $1392 \times 1032$ . 将图 8(a) 进行裁剪, 得到大小分别为  $512 \times 512$  和  $256 \times 256$  的全息图, 如图 8(d), (g) 所示; 图 8(e), (h) 为其频谱分布图, 图 8(f), (i) 为相应的强度再现结果. 比较图 8(c) 与 (f), 显见 (f) 中的数字“8”和“9”变得很模糊, 这是由于全息图被裁剪后, 系统的视场减小了, 使得含有数字“8”和“9”的区域变为新视场的边缘区域, 此区域中的高频成分(即图像细节)未被记录下来, 从而造成了再现像边缘分辨率降低. 这充分表明了预放大数字全息再现像中边缘区域点的信息记录与再现是不完整的. 比较图 8(c), (f), (i), 显见图 (i) 所示的再现像分辨率明显降低, 这表明了预放大数字全息术的成像分辨率随着 CCD 光敏面尺寸的减小而降低, 该结论与前期理论研究结果相一致<sup>[15]</sup>. 此外, 将图 8(c), (f),

(i) 与图 4 后两列比较可知, 预放大数字全息再现像的背景噪声比像面数字全息再现像要大得多. 对于 CCD 位于像面后的情况, 即像后预放大数字全息术, 有完全相同的结论.

## 5 结论

本文采用理论分析与实验验证相结合的方法, 分析了像面数字全息的记录与再现过程, 基于此分析了 CCD 参数对系统成像分辨率的影响, 然后结合对平面参考光像面数字全息系统点扩散函数的分析, 讨论了像面数字全息系统成像分辨率的决定因素, 并对该系统的成像特点进行了分析. 结果表明: 记录器件光敏面尺寸大小对像面数字全息系统的成像分辨率影响甚微, 且对于常见像元尺寸的记录器件来说, 其像素大小的变化对成像分辨率的影响也不大. 这样就可以利用小尺寸 CCD 实现数字全息高分辨率成像. 同时得到像面数字全息系统是一种优化的数字全息系统, 该系统可以实现对物体信息的完整记录与再现, 其成像分辨率和像质都优于预放大数字全息显微系统. 利用分辨率测试板和血细胞所做的各种实验结果均表明了理论分析的正确性. 本文结果对数字全息显微的研究具有重要的指导意义, 并为降低数字全息显微系统的成本奠定了良好的基础.

- [1] Hao Y, Asundi A 2011 *Appl. Opt.* **50** 183
- [2] Das B, Yelleswarapu C S, Rao L N 2012 *Appl. Opt.* **51** 1387
- [3] Hu H F, Wang X L, Guo W G, Zhai H C, Wang P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 017901 (in Chinese) [胡浩丰, 王晓雷, 郭文刚, 翟宏琛, 王攀 2011 物理学报 **60** 017901]
- [4] Li J C, Lou Y L, Gui J B, Peng Z J, Song Q H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 124203 (in Chinese) [李俊昌, 楼宇丽, 桂进赋, 彭祖杰, 宋庆和 2013 物理学报 **62** 124203]
- [5] Zhang Y Z, Guohai S, Giancarlo P, Wang D Y, Bahram J, Wolfgang O 2013 *Opt. Commun.* **286** 56
- [6] Liu C, Liu Z, Bo F 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 3143
- [7] Granero L, Mico V, Zalevsky Z, Garcia J 2009 *Opt. Express* **17** 15008
- [8] Granero L, Zzlevsky Z, Mico V 2011 *Opt. Lett.* **17** 1149
- [9] Hussain A, Mudassar A A 2012 *Opt. Commun.* **285** 2303
- [10] Ochoa N A, Landgrave J E A 2011 *Opt. Express* **19** 23613
- [11] Li Y, Xiao W, Pan F, Rong L 2013 *High Power Laser and Particle Beams* **25** 1345
- [12] Li Y, Lilley F, Burton D 2010 *Appl. Opt.* **49** 1643
- [13] Park Y, Choi W, Yaqoob Z 2009 *Opt. Express* **17** 12285
- [14] Mico V, Zalevsky Z, Garcia-Martinez P 2006 *Appl. Opt.* **45** 822
- [15] Wang H Y, Wang G J, Zhao J, Xie J J, Wang D Y 2008 *Acta Photo. Sin.* **37** 929 (in Chinese) [王华英, 王广俊, 赵洁, 谢建军, 王大勇 2008 光子学报 **37** 929]
- [16] Wang H Y, Liu F F, Song X F, Liao W, Zhao B Q, Yu M J, Liu Z Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024207 (in Chinese) [王华英, 刘飞飞, 宋修法, 廖薇, 赵宝群, 于梦杰, 刘佐强 2013 物理学报 **62** 024207]
- [17] Li J C, Fan Z B, Patrice T, Song Q H, Pascal P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 034204 (in Chinese) [李俊昌, 樊则宾, Patrice T, 宋庆和, Pascal P 2011 物理学报 **60** 034204]
- [18] Wang H Y, Ma J, Yuan C J 2013 *Opt. Commun.* **307** 50
- [19] Goodman J W 1996 *Introduction to Fourier Optics* (2nd Ed.) (New York: McGraw-Hill)

# High-resolution digital holographic microscopy realized by small size CCD camera\*

Wang Hua-Ying<sup>1)2)†</sup> Yu Meng-Jie<sup>2)</sup> Jiang Ya-Nan<sup>3)</sup> Song Xiu-Fa<sup>1)</sup>  
Zhu Qiao-Fen<sup>1)</sup> Liu Fei-Fei<sup>2)</sup>

1) (College of Science, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

2) (School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

3) (College of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 15 August 2013; revised manuscript received 6 October 2013)

## Abstract

In order to achieve high-resolution imaging by reducing the cost of digital holographic microscopy system, the recording and reconstruction process of image-plane digital holographic system (IPDHS) and its point spread function are analyzed. Then, the determination factor of lateral resolution of IPDHS is investigated. It is concluded that the dependence of lateral resolution of IPDHS on the photosensitive surface size of the recording device is very weak, which is completely different from the common knowledge that the lateral resolution of digital holographic imaging system can be improved by using large size recording device. Then the imaging characteristics of an IPDHS are analyzed. The results show that the information about the tested object can be completely recorded and reconstructed by image-plane digital holography, and that the lateral resolution of IPDHS is higher than that of pre-magnification digital holography. Two IPDHS with plane and spherical reference wave are built. The experimental results are in accordance with the theoretical analysis.

**Keywords:** image-plane digital holography, lateral resolution, point spread function, small size CCD

**PACS:** 42.30.Kq, 42.40.Kw, 42.30.-d

**DOI:** 10.7498/aps.62.244203

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61077001, 61144005), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant Nos. F2010001038, F2012402051, F2012402028), and the Key Technology Research and Development Program of Hebei Province, China (Grant Nos. 09277101D, 13210201D).

† Corresponding author. E-mail: pbxsyngzi@126.com