

## 优化的数字全息显微成像系统\*

王华英<sup>1)2)†</sup> 刘飞飞<sup>1)</sup> 廖薇<sup>1)</sup> 宋修法<sup>2)</sup> 于梦杰<sup>1)</sup> 刘佐强<sup>1)</sup>

1) (河北工程大学信息与电子工程学院, 邯郸 056038)

2) (河北工程大学理学院, 邯郸 056038)

(2012年9月9日收到; 2012年10月30日收到修改稿)

基于预放大数字全息显微系统的全息图记录与再现过程及其点扩散函数的分析, 从成像分辨率、成像质量及实现的难易程度等方面对数字全息显微中六种常见记录光路系统的成像性能进行了对比研究. 结果表明, 像面数字全息术具有最高的成像分辨率及成像质量, 其成像分辨率与记录器件的光敏面尺寸无关, 该系统对信息的记录是完整的, 而且记录过程不必考虑物体被照亮区域的大小, 再现过程非常简单, 是优化的数字全息显微成像系统. 等波面弯曲的物参光像面数字全息术非常有利于位相解包裹及位相畸变补偿的正确进行, 该系统更适用于位相显微. 实验结果验证了理论分析的正确性.

**关键词:** 显微数字全息, 预放大数字全息, 像面数字全息, 分辨率

**PACS:** 42.30.Kq, 42.30.-d, 42.30.Wb, 87.57.Cf

**DOI:** 10.7498/aps.62.054208

## 1 引言

数字全息术的独特优点使其成为近年来重要国际前沿研究领域之一<sup>[1-14]</sup>. 显微成像与测量是数字全息应用中的重要组成部分, 该技术已被广泛应用于生物、医学、微机电、微光学、力学、材料、化学等显微领域<sup>[3-10]</sup>.

预放大数字全息显微记录系统是数字全息显微术 (DHM) 最常用的记录光路, 该光路是在物光路中加入一个显微物镜 (MO) 用于放大物体中的精细结构, 从而实现高分辨率成像. 预放大 DHM 按记录器件的位置可分为两种情况: 像前预放大和像后预放大数字全息术; 按参考光波的不同又可分为: 平面和球面参考光预放大 DHM. 此外, 预放大 DHM 还有一种特殊情况——像面数字全息术. 因此, 用于数字全息显微成像的记录光路结构共有六种. 从现有文献看, 这几种光路中应用最多的是平面及球面参考光记录的像前预放大数字全息术, 像面数字全息术在近几年也得到了比较广泛的应用.

究竟哪种记录光路系统具有更多的优越性, 如何优化光路系统, 是一项有意义的研究工作, 但相关研究至今未见报道.

本文从系统成像分辨率、成像质量、实现的难易程度等方面对以上几种数字全息成像系统进行分析和比较, 并通过实验加以验证, 得出优化的数字全息显微记录与再现系统, 以提高数字全息显微成像的质量和效率.

## 2 预放大数字全息显微系统

## 2.1 平面参考光数字全息图的记录及再现

图 1 为平面参考光像前预放大数字全息显微记录及再现采用的坐标系统示意图. 其中, MO 已用单透镜等效表示,  $F$  为其焦点, 焦距为  $f$ ;  $x_0-y_0$ ,  $x_\phi-y_\phi$ ,  $x-y$ ,  $x_i-y_i$  依次表示物体、MO、全息图和再现像平面;  $R(x,y)$  为离轴平面参考光, 其传播方向与主轴的夹角为  $2^\circ-3^\circ$ . 此外, 图中  $d_0$  为 MO 的物距、 $d_\phi+d=d_i$  为其像距、 $d$  为全息图的记录距离. 对于像后预放大数字全息术, CCD 平面位于像平面

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61077001 和 61144005)、河北省自然科学基金 (批准号: F2010001038、F2012402028 和 F2012402051)、河北省科技支撑计划 (批准号: 09277101D) 和河北省教育厅科技计划重点项目 (批准号: ZH2011241) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: pbxsyngzi@126.com

之后距离为  $d$  处。

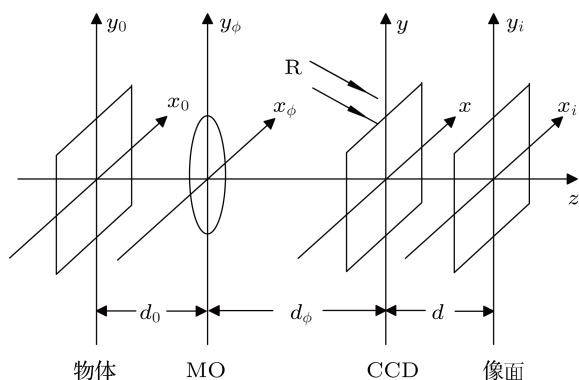


图1 平面参考光预放大数字全息坐标系示意图

为了表达上的简洁,下面推导中除特别说明外,一般只给出一维形式。

设待测物体的复振幅分布为  $o(x_0, y_0)$ , MO 的孔径函数为  $P(x_\phi, y_\phi) = \text{circ}(r/R)$ , 根据菲涅耳衍射公式, 忽略无关紧要的常数位相因子, 则 MO 前、后表面的衍射光场复振幅分别为

$$U'(x_\phi) = \int_{-\infty}^{\infty} o(x_0) \exp\left[\frac{jk}{2d_0}(x_\phi - x_0)^2\right] dx_0, \quad (1)$$

$$U(x_\phi) = U'(x_\phi)P(x_\phi) \exp\left[-\frac{jk}{2f}x_\phi^2\right]. \quad (2)$$

CCD 平面物光场分布

$$O(x) = \int_{-\infty}^{\infty} U(x_\phi) \times \exp\left[\frac{jk}{2d_\phi}(x - x_\phi)^2\right] dx_\phi. \quad (3)$$

同理, 参考光在 CCD 平面的复振幅分布为

$$R(x) = R_0 \exp[-j2\pi(f_x x)], \quad (4)$$

式中  $f_x$  为平面参考光波在  $x$  方向的空间频率,  $R_0$  为其振幅. 物光与参考光在 CCD 平面形成的干涉条纹强度分布为

$$H(x) = |O(x)|^2 + R_0^2 + R^*(x)O(x) + O(x)^*R(x). \quad (5)$$

CCD 记录的数字全息图为

$$H_D(x, y) = \left[ H(x, y) \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{\alpha\Delta x}, \frac{y}{\beta\Delta y}\right) \right] \times \text{comb}\left(\frac{x}{\Delta x}, \frac{y}{\Delta y}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right), \quad (6)$$

式中  $\otimes$  表示卷积运算,  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  和  $L_x$ 、 $L_y$  分别为 CCD 沿两个相互垂直方向的像元尺寸及光敏面尺寸,  $a$ 、 $b$  ( $a, b \hat{I}(0,1)$ ) 为其填充因子。

为了讨论的方便, 仍然以连续光场形式进行光波场的再现. 采用原参考光波  $R$  照射全息图, 得到  $|R|^2 O$ , 经衍射传播可在 MO 的像面上得到原始像, 为实像, 其像场分布为

$$U_{+1}(x) = R_0^2 \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}\right) O(x) \times \exp\left[\frac{jk}{2d}(x_i - x)^2\right] dx, \quad (7)$$

式中  $\text{rect}(x/L_x)$  的作用是限制 CCD 记录的光场范围. 由 (7) 式便可以得到再现像的强度分布和含有二次及一次位相畸变的包裹位相分布, 通过适当的位相畸变补偿及解包裹运算即可获得物体的连续位相分布。

## 2.2 球面参考光数字全息图的记录及再现

在图 1 所示的系统中, 利用球面参考光代替平面参考光, 即为球面参考光预放大数字全息术. 若使球面参考光源位于 MO 的焦平面上, 则形成等波面弯曲的物参光预放大数字全息系统<sup>[15]</sup>。

由于 CCD 光敏面较小, 可以认为球面参考光在记录平面内的振幅为常数, 设其为  $R'_0$ , 并设离轴参考光源在  $x, y$  方向偏离系统光轴分别为  $x_r$  和  $y_r$ , 则参考光在 CCD 平面形成的光场复振幅为

$$R(x) = R'_0 \exp\left[\frac{jk}{2(d_i - f - d)}(x - x_r)^2\right]. \quad (8)$$

对于球面参考光预放大数字全息术来说, 要想在 MO 的像面上得到清晰的再现像, 经再现光波照射全息图后, 在紧贴全息图后表面得到的应该是物体的衍射光场  $O(x, y)$ , 为此, 再现光波应该是与记录参考光等曲率的球面光波. 考虑到  $x_r, y_r$  无法精确得到, 因此, 再现光波采用位于光轴上的球面光源. 不失一般性, 设其在 CCD 平面的振幅为 1, 则其表达式为

$$C(x) = \exp\left[\frac{jk}{2(d_i - f - d)}x^2\right]. \quad (9)$$

由此得到原始像光场的复振幅分布为

$$U_{+1}(x_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}\right) C(x) R^*(x) O(x) \times \exp\left[\frac{jk}{2d}(x_i - x)^2\right] dx$$

$$\begin{aligned}
 &= A \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}\right) O(x) \\
 &\quad \times \exp\left[j2\pi \frac{x_r}{\lambda(d_i - f - d)} x\right] \\
 &\quad \times \exp\left[\frac{jk}{2d}(x_i - x)^2\right] dx, \quad (10)
 \end{aligned}$$

其中  $A$  为常数因子.

### 2.3 预放大数字全息系统的成像分辨率

根据瑞利判据, 光学系统的成像分辨率由系统点扩散函数的主瓣半宽决定. 为此, 首先分析上述预放大数字全息显微成像系统的点扩散函数.

暂且忽略 CCD 像元的抽样影响, 但考虑 MO 及 CCD 的有限孔径. 设物函数是由位于物平面上  $(\xi, \eta)$  处点源发出的单位振幅球面光波, 则  $o(x_0, y_0) = \delta(x_0 - \xi, y_0 - \eta)$ , 将其代入 (3) 式, 并分别联立 (4), (7) 式及 (8)—(10) 式, 经过复杂的数学运算<sup>[16]</sup>, 可分别得到上述平面及球面参考光记录的预放大数字全息系统的点扩散函数如下:

$$\begin{aligned}
 h_{\text{PF}}(x_i, \xi) &= A_{\text{PF}} \exp\left(\frac{jk}{2d} x_i^2\right) \text{sinc}\left[\left(\frac{R}{\lambda d_i}\right)(x_i + M\xi)\right] \\
 &\quad \otimes \left\{ \text{sinc}\left[\left(\frac{N_x \Delta x}{\lambda d}\right)(x_i + M\xi)\right] \right. \\
 &\quad \left. \times \exp\left(-\frac{j\pi d_\phi}{\lambda d d_i} x_i^2\right) \right\}, \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_{\text{SF}}(x_i, \xi) &= A_{\text{SF}} \exp\left(\frac{jk}{2d} x_i^2\right) \\
 &\quad \times \text{sinc}\left[\frac{R}{\lambda d_i} \left(x_i + M\xi - \frac{d}{d_r} x_r\right)\right] \\
 &\quad \otimes \left\{ \text{sinc}\left[\left(\frac{N_x \Delta x}{\lambda d}\right) \left(x_i + M\xi - \frac{d}{d_r} x_r\right)\right] \right. \\
 &\quad \left. \times \exp\left(-\frac{j\pi d_\phi}{\lambda d d_i} x_i^2\right) \right\}, \quad (12)
 \end{aligned}$$

式中  $M = -d_i/d_0$  为再现像的放大倍率,  $A_{\text{PF}}, A_{\text{SF}}$  均为常数因子. (11) 和 (12) 式中的第一个 sinc[] 函数在二维情况下变为一阶贝塞尔函数, 即  $J_1(2\pi R\rho)/R\rho$  (其中  $\rho$  为空间频率坐标, 在二维情况下其取值为

$$\begin{aligned}
 \rho &= \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \\
 &= \sqrt{(x + M\xi)^2 + (y + M\eta)^2} / \lambda d_i.
 \end{aligned}$$

(11) 与 (12) 式并无实质上的差异, (12) 式中  $-d/d_r x_r$  的出现, 是由于球面再现参考光与原记录参考光不同, 从而使再现的原始像偏离了坐标平面中心. 而对于平面参考光情况, 由于再现参考光与记录参考光相同, 再现的原始像位于像平面中心. 因此, 为了简便, 可以根据 (11) 式来讨论两种像前预放大数字全息显微系统的成像分辨率.

由 (11) 式, 预放大数字全息显微系统的点扩散函数等于 MO 成像的点扩散函数和 CCD 单元成像的点扩散函数的卷积. 不过, 对于显微成像来说, 卷积的扩展作用是很小的<sup>[16]</sup>.  $J_1(2\pi R\rho)/R\rho$  的主瓣半宽取决于 MO 的数值孔径, 而  $\text{sinc}\left[\left(\frac{N_x \Delta x}{\lambda d}\right)(x_i + M\xi)\right]$  的主瓣半宽与全息图的记录距离成正比、与 CCD 的光敏面尺寸成反比. 此外, 由 (6) 式可知, 对于实际记录的数字全息图来说, 还存在 CCD 像元的平均效应, 而且这种平均作用的大小取决于 CCD 像元的大小. 因此, CCD 成像单元的点扩散函数的主瓣半宽还与 CCD 像元的大小有关, 像元越大, 主瓣半宽越大.

总之, 对于像前预放大 DHM 来说, MO 的数值孔径越大, 分辨率越高; 记录距离越小, CCD 的光敏面尺寸越大、像元尺寸与填充因子的乘积越小, 系统的成像分辨率越高. 但由于卷积的扩展作用很小, 因此, 通过提高 CCD 单元的成像分辨率来提高整个预放大数字全息显微系统的分辨率的效果是极其有限的.

对于像后预放大数字全息图, 由于全息图位于像面后方, 因而再现时需要逆向传播才能得到物体的原始像. 对于平面参考光像后预放大数字全息术而言, 这意味着再现距离为  $-d$ , 因而, 可令  $d' = -d$ , 将 (7) 式中的  $d$  用  $d'$  来代替, 同时代入此种情况下的关系式  $d_i = d_\phi - d = d_\phi + d'$ , 则可以推得系统的点扩散函数如下:

$$\begin{aligned}
 h_{\text{PB}}(x_i, \xi) &= A_{\text{PB}} \exp\left(-\frac{jk}{2d} x_i^2\right) \\
 &\quad \times \text{sinc}\left[\left(\frac{R}{\lambda d_i}\right)(x_i + M\xi)\right] \\
 &\quad \otimes \left\{ \text{sinc}\left[\left(\frac{N_x \Delta x}{\lambda d}\right)(x_i + M\xi)\right] \right. \\
 &\quad \left. \times \exp\left(\frac{j\pi d_\phi}{\lambda d d_i} x_i^2\right) \right\}. \quad (13)
 \end{aligned}$$

球面参考光像后预放大数字全息显微系统的点扩散函数与 (12) 式有相似的形式. 比较 (11) 和

(13) 式可见, 它们的差别仅在于二次位相因子前面的正、负号. 因此, 像后预放大数字全息显微系统的成像分辨率与像前预放大系统有相同的结论.

根据前面的分析可见, 无论是像前还是像后预放大数字全息显微系统, 其成像分辨率均随着全息图记录距离的减小而提高. 因此, 记录距离  $d = 0$  是其极端情况, 也是像前与像后预放大的临界情况. 由于上述推导基于菲涅耳衍射公式, 当  $d \rightarrow 0$  时, (7), (10)—(13) 式均不成立, 因此从数学角度来看, 此极端情况下系统的成像分辨率可能最高, 也可能最低. 但从物理的角度来看, 实际系统的性能是不会发生突变的, 因而, 记录距离为零的情况, 即像面数字全息成像系统应该具有最高的成像分辨率. 但这种情况下全息图的再现过程已经完全不同与预放大 DHM.

### 3 像面数字全息成像系统

#### 3.1 像面数字全息图的记录及再现

将上述记录平面移至系统的成像平面处, 即可分别实现平面和球面参考光像面数字全息术. 此时,  $d_\phi = d_i$ , 即  $x_i-y_i$  平面与  $x-y$  平面重合.

像面数字全息术记录的是物体本身的像光场信息, 因此, 无论是平面还是球面参考光像面数字全息图, 只要用平行于光轴的平面光波照射全息图, 就可以在紧贴全息图后的平面内得到物体的像光场. 但为了消除零级衍射项及共轭像的干扰, 需要对全息图进行频谱滤波. 原始像光场的二维复振幅分布如下:

$$U_{+1}(x,y) = \text{FT}^{-1} \{ \text{FT}[H(x,y)] \cdot W(x,y) \} = R^*(x,y)O(x,y), \quad (14)$$

式中“FT”和“FT<sup>-1</sup>”分别表示二维傅里叶变换及其逆变换,  $W(x,y)$  表示透明滤波窗函数. 可见, 与预放大情况相比, 像面数字全息图的再现过程要简单得多. 利用现代高性能计算机, 像面数字全息图的重建时间可达几十甚至几 ms.

#### 3.2 像面数字全息系统的成像分辨率及像质

令  $o(x_0, y_0) = \delta(x_0 - \xi, y_0 - \eta)$ , 并用 (6) 式中的  $H_D(x,y)$  代替 (14) 式中的  $H(x,y)$ , 然后联立 (1)—(5) 式, 经计算后得到平面参考光情况下的原始像光场复振幅分布, 即平面参考光像面数字全息系统的点

扩散函数为

$$\begin{aligned} \text{PSF}_{\text{PI}}(x,y;\xi,\eta) &= A'_p \exp \left[ \frac{jk}{2d_0} (\xi^2 + \eta^2) \right] \\ &\times \left\langle \left\{ \exp \left[ \frac{jk}{2d_i} (x^2 + y^2) \right] \right. \right. \\ &\times \exp \left[ -j2\pi(f_x x - f_y y) \right] \\ &\times \left. \left. \frac{J_1[2\pi R\rho]}{R\rho} \right\} \otimes \text{rect} \left( \frac{x}{\alpha\Delta x}, \frac{y}{\beta\Delta y} \right) \right\rangle \\ &\times \text{comb} \left( \frac{x}{\Delta x}, \frac{y}{\Delta y} \right) \text{rect} \left( \frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y} \right). \quad (15) \end{aligned}$$

同理, 可得到球面参考光像面数字全息成像系统的点扩散函数为

$$\begin{aligned} \text{PSF}_{\text{SI}}(x,y) &= A'_s \left\langle \left\{ \exp \left[ \frac{jk}{d_i - f} (x_r x + y_r y) \right] \right. \right. \\ &\times \left. \left. \frac{J_1[2\pi R\rho]}{R\rho} \right\} \otimes \text{rect} \left( \frac{x}{\alpha\Delta x}, \frac{y}{\beta\Delta y} \right) \right\rangle \\ &\times \text{comb} \left( \frac{x}{\Delta x}, \frac{y}{\Delta y} \right) \text{rect} \left( \frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y} \right), \quad (16) \end{aligned}$$

式中  $A'_p, A'_s$  为复常数,  $\rho$  为空间频率坐标. (15), (16) 式中函数  $\text{rect}(x/L_x, y/L_y)$  的作用仅仅是限制 CCD 记录的光场范围, 与点扩散函数的主瓣半宽无关. 因此, 像面数字全息系统的成像分辨率主要取决于 MO 的数值孔径, 并与 CCD 像元大小和其填充因子的乘积有关, 而与 CCD 光敏面尺寸无关. 数字全息系统的成像分辨率与记录器件光敏面尺寸无关的结论与所有非像面数字全息系统的情况完全不同. 这是像面数字全息术的一个非常重要的优点, 我们可以利用小像元尺寸、小幅面的记录器件实现高分辨率成像.

若忽略 CCD 像元的平均效应, 则像面数字全息系统的成像分辨率等于 MO 的成像分辨率. 显然, 此分辨率比预放大数字全息显微系统的高, 表明了上述推断的正确性.

图 2 是透镜成像光路及 CCD 记录放大像的示意图. 其中,  $A', B'$  是与物点  $A, B$  对应的理想像点. 由图可见, 在数字全息成像系统中, 像面是一个极其特殊的衍射传播平面, 在此平面上, 成像区域中各点发出的所有通过透镜的频率成分均被 CCD 记录下来, 而在像平面前或后的其他平面上, 成像区域中靠近边缘的点发出的、通过透镜的光波中的高频成分没有被 CCD 记录下来, 且距离像面越

远, 未被记录的高频成分越多. 此外, 当 CCD 位于像面位置时, 成像区域外的点发出的通过透镜的所有频率成分均不能被 CCD 记录. 因此, 像面数字全息术对物体的信息记录是完整的, 由该系统得到的再现像质量最高. 这同时也表明, 在像面数字全息图记录过程中, 根本不必去考虑物体上被照亮区域

的大小, 因为无论多大的照亮区域都不会影响全息图的记录及再现像质量. 由图 2 还可以看出, 若用同样的 CCD, 像前预放大数字全息图所记录的物体区域大于  $A'B'$  范围, 而像后预放大数字全息图所记录的物体区域小于  $A'B'$  范围, 因此, 像后预放大 DHM 一般不可取.

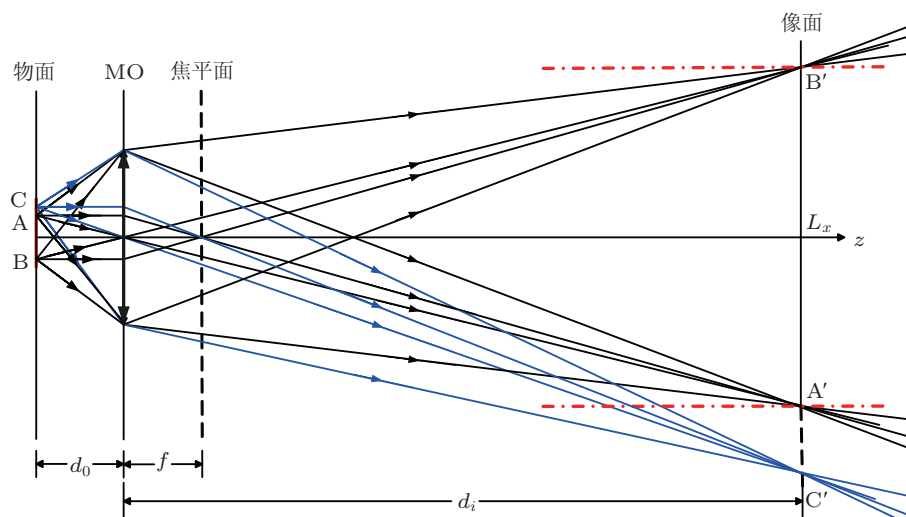


图 2 透镜成像光路及 CCD 记录放大像示意图

根据上述分析, 像面数字全息成像系统具有最高的成像分辨率和成像质量, 是一种优化的显微成像系统. 由 (15) 和 (16) 式可知, 利用平面和球面参考光像面数字全息术得到的原始再现像光场分别存在二次和一次位相畸变. 由于一次位相畸变相对容易校正<sup>[17]</sup>, 也有利于位相解包裹的正确进行, 因此, 球面参考光像面数字全息术相对更易于实现. 同时, 球面参考光像面数字全息图具有平行等间距的直条纹特征, 最能充分利用 CCD 的有限带宽. 因而, 物参光等波面弯曲的球面参考光像面数字全息术更适合于位相显微.

为了实现高分辨率成像, 采用高数值孔径 MO 及小像元尺寸、小填充因子 CCD 是有效的方法, 但需要使像的放大率接近于 MO 的标称值. 采用大幅面 CCD 可以提高系统的视场大小.

#### 4 实验结果及讨论

实验参数如下: 激光波长  $\lambda = 623.8 \text{ nm}$ ; CCD 像元大小  $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ 、像素数  $1392 \times 1032$ 、16 bit 灰度级输出. 除特别说明外, 实验中  $\text{MO}_1$  和  $\text{MO}_2$  的参数均为: 放大倍率 40、数值孔径 0.65、焦距  $4.65 \text{ mm}$ , MO 成像的理论极限分辨率是  $0.59 \mu\text{m}$ .

图 3 是利用球面参考光及不同记录距离下

的像前预放大数字全息显微记录光路得到的 USAF1951 分辨率测试板的强度再现结果. 该实验中所用 MO 参数如下: 放大倍率为 25、数值孔径为 0.40、焦距  $10.13 \text{ mm}$ , 此 MO 成像的理论极限分辨率是  $0.97 \mu\text{m}$ . 图 3(a) 是像面数字全息重建结果, 图中分辨率测试板的第 7.6 组线条被无失真地清晰再现, 说明系统的成像分辨率远高于此组线条的宽度  $2.19 \mu\text{m}$ ; 图 3(b)—(h) 分别是在记录距离为  $37 \text{ mm}$ ,  $52 \text{ mm}$ ,  $72 \text{ mm}$ ,  $93 \text{ mm}$ ,  $103 \text{ mm}$ ,  $117 \text{ mm}$  和  $130 \text{ mm}$  情况下的预放大数字全息重建结果. 比较图 3(a) 与其他图, 显见其分辨率最高、像质最好. 对于图 3(b), 由于记录距离太小, 使得再现像平面像素太小, 从而导致再现像发生部分折叠, 影响再现效果. 比较图 3(c)—(h) 可见, 随着全息图记录距离的增大, 再现像的分辨率逐渐降低, 尤其是当记录距离达到  $117 \text{ mm}$  以后, 分辨率明显降低, 噪声明显增强; 但在记录距离达到  $93 \text{ mm}$  之前, 再现像质及再现像分辨率变化甚微. 可见, 实验结论证明了上述对于像面及预放大数字全息显微系统分辨率及像质的理论分析的正确性.

图 4(a)—(c) 分别是利用平面参考光像面数字全息术得到的另一个 USAF1951 分辨率测试板的全息图、全息图频谱及其强度再现像, 图 4(d) 是 (c)



的部分放大. 图 5 是将图 4(a) 裁剪后的全息图 (相当于用小光敏面 CCD 进行记录) 及其再现结果. 比较图 4(d) 与 5(d) 可见, 这两幅图的差别甚微. 这充分证明了像面数字全息再现像的横向分辨率与记录器件光敏面尺寸无关的结论.

图 6 是由球面参考光像面数字全息术得到的人体血红细胞的实验结果. 其中, 图 6(a)—(d) 分别

是所记录的全息图、全息图频谱、再现的二维位相部分放大图及其三维显示, 图 6(e) 是 (c) 中红色圆环内细胞的三维位相放大图. 实验记录参数如下:  $d_0 = 4.74 \text{ mm}$ ,  $d_i = 241.26 \text{ mm}$ ,  $M = 50.9$ . 从图中可以清楚地看出细胞的形态, 获得细胞大小, 如图 6(c) 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.

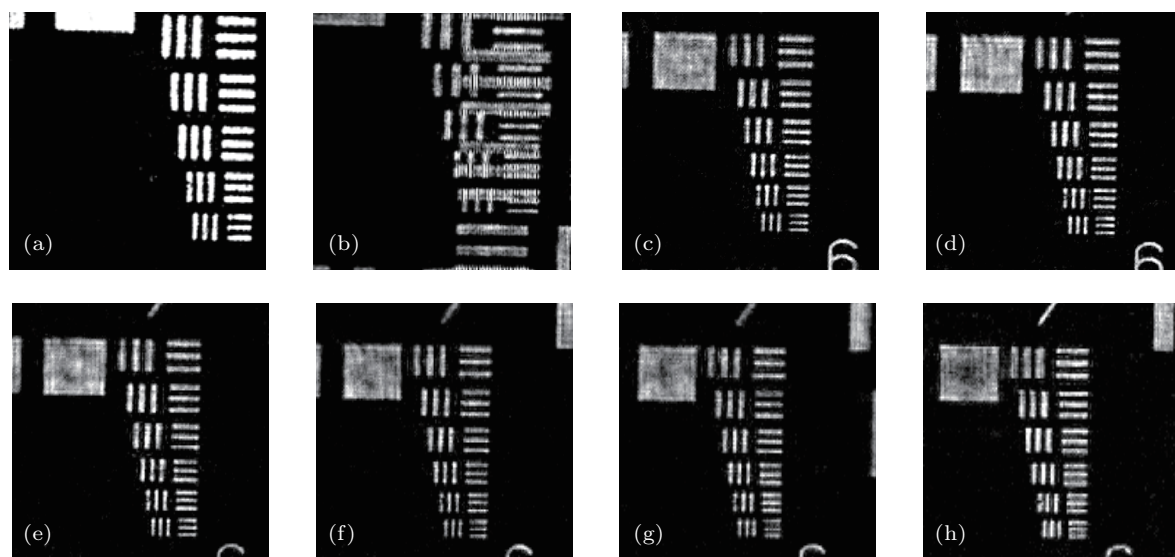


图 3 球面参考光及不同记录距离下预放大数字全息的强度重建结果 (a) $d = 0$ ; (b) $d = 37 \text{ mm}$ ; (c) $d = 52 \text{ mm}$ ; (d) $d = 72 \text{ mm}$ ; (e) $d = 93 \text{ mm}$ ; (f) $d = 103 \text{ mm}$ ; (g) $d = 117 \text{ mm}$ ; (h) $d = 130 \text{ mm}$

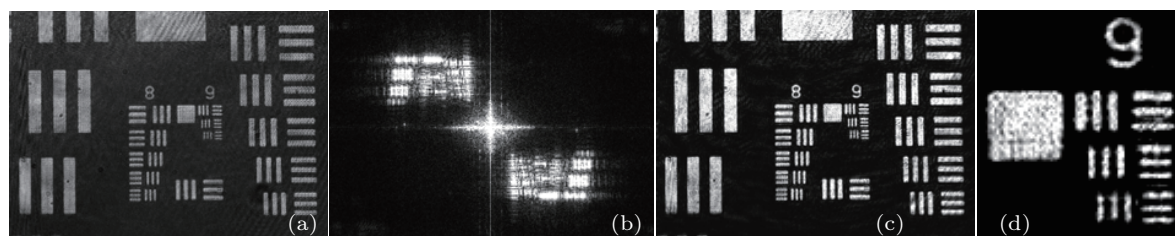


图 4 平面参考光像面数字全息实验结果 (a) 全息图; (b) 全息图频谱; (c) 强度再现像; (d) (c) 的部分放大

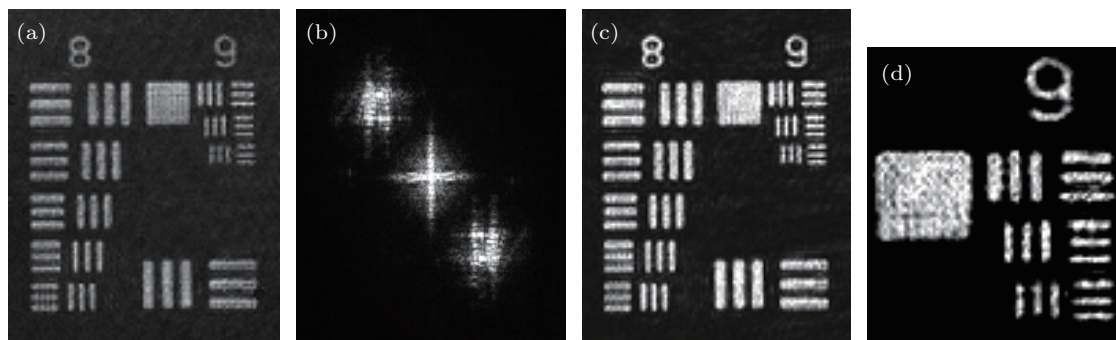


图 5 裁剪后的全息图及其再现结果 (a) 裁剪后的全息图; (b) 全息图频谱; (c) 强度再现像; (d) (c) 的部分放大

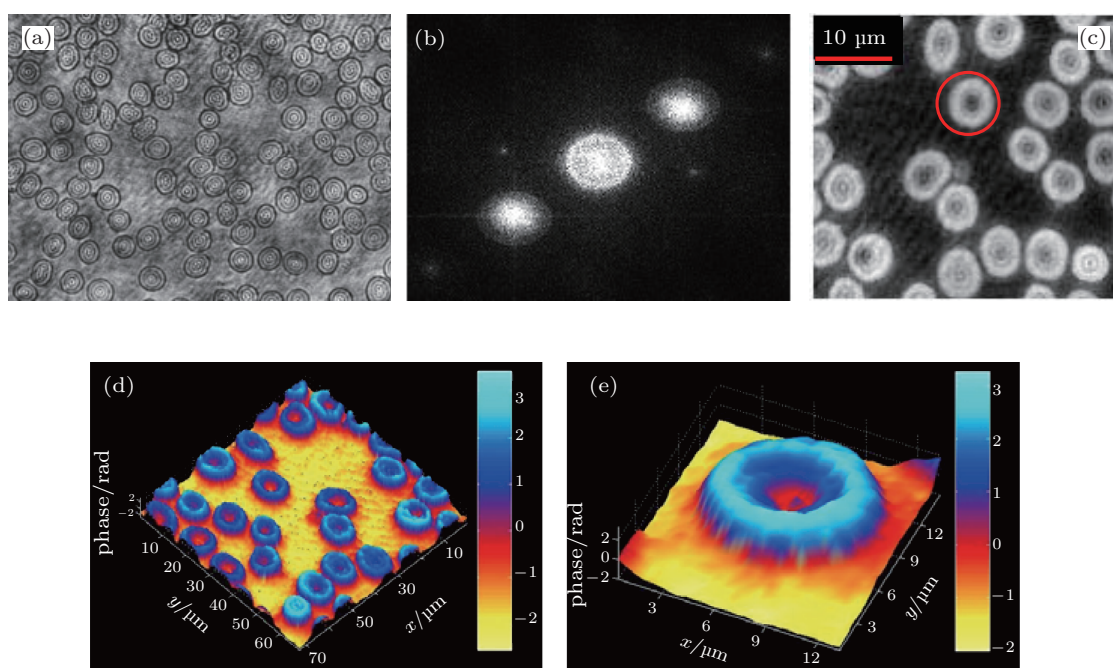


图6 球面参考光像面 DHM 对人体红细胞的实验结果 (a) 全息图; (b) 全息图频谱; (c) 二维位相分布的部分放大图; (d)(e) 的三维显示; (e)(c) 中红色圆环内细胞的三维位相放大图

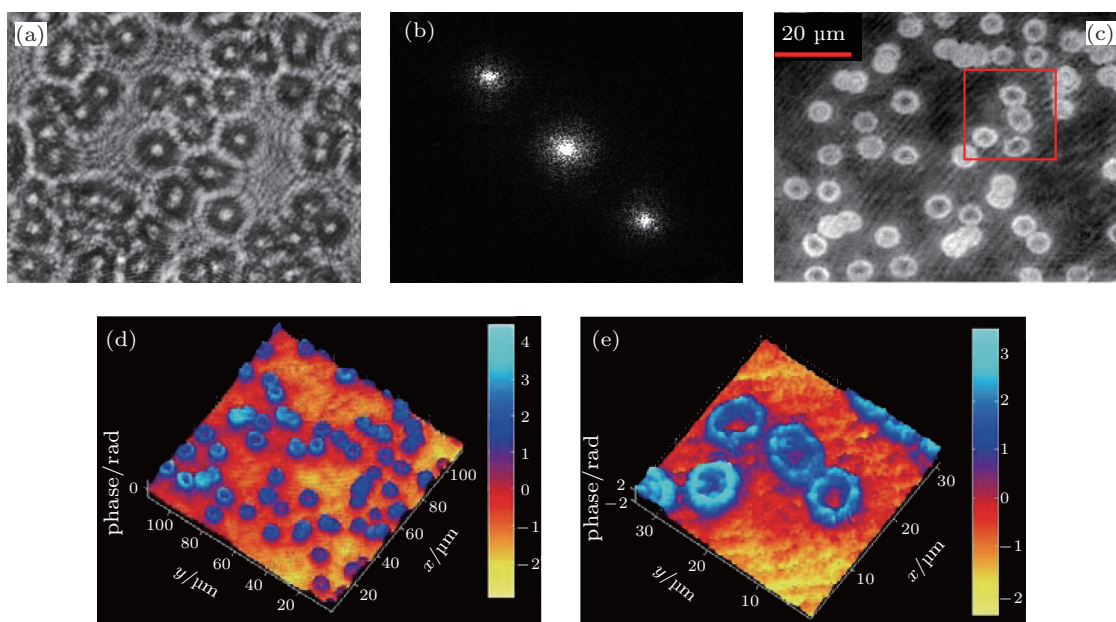


图7 球面参考光预放大 DHM 对人体红细胞的实验结果 (a) 全息图; (b) 全息图的频谱分布; (c) 二维位相分布; (d)(e) 的三维显示; (e)(c) 中红框内细胞的三维位相分布

图7是利用球面参考光预放大 DHM 得到的人体红细胞的实验结果. 实验中参数如下:  $d_0 = 4.72 \text{ mm}$ ,  $d_i = 307.98 \text{ mm}$ ,  $d = 78 \text{ mm}$ ,  $M = 65.5$ . 图7(a)—(d)依次是全息图、全息图频谱、

再现光场的二维位相及其三维显示, 图7(e)是(d)的部分放大.

比较图6和图7的(d), (e), 显见图7(d), (e)无论是从分辨率方面还是从像质上都比图6差了许多

多. 这再次表明了像面数字全息术优于预放大数字全息术.

## 5 结论

本文通过理论分析与实验验证相结合的方法, 对数字全息显微中常见的几种光路系统进行了比较研究, 包括平面及球面参考光记录的像前、像后预放大及像面数字全息术六种情况. 从成像分辨率、再现像质量、实现的难易程度等方面进行了

比较, 结果表明: 像面数字全息术具有最高的成像分辨率及成像质量, 其成像分辨率与记录器件的光敏面尺寸无关, 该系统对信息的记录是完整的, 而且再现过程非常简单, 同时还可以实时观察待测物体的情况, 是一种优化的数字全息显微成像系统. 从位相重建的角度来看, 等波面弯曲的物参光像面数字全息术, 不仅具有最高的信息容量, 而且有利于位相解包裹及位相畸变补偿的正确进行, 该系统更适合于位相显微. 本文研究结果对于数字全息显微成像具有重要的指导作用.

- 
- [1] Eilenberger F, Minardi S, Pliakis D, Pertsch T 2012 *Opt. Lett.* **37** 509
- [2] Anand A, Chhaniwal V K, Javidi B 2010 *J. Dis. Tech.* **6** 500
- [3] Miccio L, Finizio A, Puglisi R 2011 *Bio. Opt. Exp.* **2** 331
- [4] Rajshekhar G, Gorthi S S, Rastogi P 2010 *Opt. Exp.* **18** 18041
- [5] Das B, Yelleswarapu C S, Rao D V G L N 2012 *Appl. Opt.* **51** 1387
- [6] Wang L, Zhao J L, Di J L, Jiang H Z 2011 *Opt. Lett.* **36** 2710
- [7] Wang Y X, Wang D Y, Zhao J, Yang Y S, Xiao X Q, Cui H Q 2011 *Chi. Opt. Lett.* **9** 030901
- [8] Ding S H, Li Q, Li Y D, Wang Q 2011 *Opt. Lett.* **36** 1993
- [9] Zhao J L, Jiang H Z, Di J L 2012 *Biomedical Optics and 3D Imaging OSA DSu3C* 1
- [10] Tsang P W M, Cheung K W K, Poon T C 2012 *Opt. Expre.* **20** A5962
- [11] 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]
- [12] Hu H F, Wang X L, Li Z L, Zhang N, Zhai H C 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 7662 (in Chinese) [胡浩丰, 王晓雷, 李智磊, 张楠, 翟宏琛 2009 物理学报 **58** 7662]
- [13] Hu H F, Wang X L, Gguo 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]
- [14] Zhang Q S, Lv X Xu, Yu Q T, Liu G Y 2009 *Chin. Phy. B* **18** 2764
- [15] Wang H Y, Guo Z J, Zhang Z H, Liu F F 2012 *J. Optoelectronics Laser* **39** 0209002 (in Chinese) [王华英, 郭中甲, 张志会, 刘飞飞 2012 中国激光 **39** 0209002]
- [16] Wang H Y, Wang G J, Zhao J, Xie J J, Wang D Y 2008 *Acta Photonica Sinica* **37** 729 (in Chinese) [王华英, 王广俊, 赵洁, 谢建军, 王大勇 2008 光子学报 **37** 729]
- [17] Cui H K, Wang D Y, Wang Y X, Liu C G, Zhao J, Li Y 2011 *Acta. Phys. Sin.* **60** 044201 (in Chinese) [崔华坤, 王大勇, 王云新, 刘长庚, 赵洁, 李艳 2011 物理学报 **60** 044201]



# Optimized digital micro-holographic imaging system\*

Wang Hua-Ying<sup>1)2)†</sup> Liu Fei-Fei<sup>1)</sup> Liao Wei<sup>1)</sup> Song Xiu-Fa<sup>2)</sup>  
Yu Meng-Jie<sup>1)</sup> Liu Zuo-Qiang<sup>1)</sup>

1) (*School of Information & Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038 China*)

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

(Received 9 September 2012; revised manuscript received 30 October 2012)

## Abstract

Based on the analysis of the recording and reconstructing of hologram and the point spread function of pre-magnification digital micro-holographic system (PMDMHS), the performances of the six common PMDMHSs are compared in imaging resolution, imaging quality and conveniences, for the first time to our knowledge. The results show that the digital image-plane holography (DIPH) has the highest imaging resolution and the best imaging quality; the resolution of DIPH is independent of the photosensitive surface size of the recording device; this system can completely record the information about the object transmitted through the micro-objective (MO); it is not needed to consider the size of illuminated region of object. Moreover, the reconstruction process of DIPH is very simple. DIPH is an optimized digital holographic imaging system. The DIPH with equal curvature of reference wavefront and object wavefront is very conducive to phase unwrapping and phase aberration compensation; therefore DIPH is more suitable for phase microscopy. The experimental results demonstrate the validation of the theoretical analysis.

**Keywords:** digital micro-holographic microscopy, pre-magnification digital holography, image-plane digital holography, resolution

**PACS:** 42.30.Kq, 42.30.-d, 42.30.Wb, 87.57.Cf

**DOI:** 10.7498/aps.62.054208

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61077001 and 61144005), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant Nos. F200810001038, F2012402028 and F2012402051), the Key Technology Research and Development Program of Hebei Province (Grant No. 09277101D), and the Scientific Research Fund of Education Department of Hebei Province (Grant No. ZH2011241).

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