

# 高质量等曲率物参光像面数字全息显微系统\*

王华英<sup>1)2)†</sup> 刘飞飞<sup>1)</sup> 宋修法<sup>2)</sup> 廖薇<sup>1)</sup> 赵宝群<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5月26日收到; 2012年7月16日收到修改稿)

对等曲率物参光像面数字全息显微成像系统进行研究, 分析了光路配置方法, 推导了系统的点扩散函数, 并由此指出了决定系统成像分辨率的因素及系统的成像特点, 最后讨论了再现像光场一次位相畸变校正的方法. 结果表明, 等曲率物参光像面数字全息具有最大的信息容量; 该系统的成像分辨率取决于显微物镜的数值孔径和 CCD 的像元大小, 与 CCD 的光敏面尺寸无关; 物体各点中通过显微物镜的所有频率成分均能被系统完全记录与再现, 样品被照亮区域的大小对记录条件和再现像质没有影响; 等曲率物参光像面数字全息系统是一种优化的全息记录与再现系统, 利用该系统可以实现高质量成像. 实验结果验证了理论分析的正确性.

**关键词:** 显微数字全息, 像面数字全息, 球面参考光, 分辨率

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

**DOI:** 10.7498/aps.62.024207

## 1 引言

数字全息术利用光电转换器件 (CCD 或 CMOS) 代替传统的全息干板记录干涉条纹, 然后送入计算机并通过数值计算重构物体的强度及位相分布. 与传统的光学全息相比, 数字全息具有许多突出的优点, 这些优点使其获得了广泛关注, 已成为一个研究热点<sup>[1-11]</sup>. 近年来, 随着记录飞秒级超快瞬态过程的脉冲数字全息技术的出现<sup>[10-13]</sup>, 数字全息术更展现出在科学研究及光学无损检测中的活力.

数字全息显微成像是数字全息术的重要应用之一<sup>[1,3,6,7]</sup>, 其最常见的记录光路是平面参考光预放大离轴菲涅耳光路<sup>[1,14]</sup>, 但该光路会引入二次位相畸变, 使光场产生很大的位相跳变, 增加位相解包裹难度, 并且不能最大限度地利用记录器件的有限带宽<sup>[14]</sup>. 球面参考光数字全息术不仅可以充分利用记录器件的带宽, 而且可以通过调节参考光路中显微物镜 (MO) 的位置, 使之产生的球面光波与物光路中 MO 产生的球面光波相对于 CCD 具有相

等的曲率, 从而消除物光路中 MO 引入的二次位相畸变. 此外, 像面数字全息术具有记录过程中可实时观察样品以便选择记录区域、再现过程简单及可实现高质量成像等特点<sup>[15]</sup>. 像面干涉术在许多高精度位相测量技术中都获得了广泛应用, 如傅里叶位相显微术、Hilbert 位相显微术及衍射位相显微术等<sup>[16,17]</sup>. 因此, 将与物光波同曲率的球面参考光引入像面数字全息术中, 构建等曲率物参光像面数字全息记录系统, 定可实现高质量显微成像. 然而, 到目前为止, 还没有看到对这种数字全息系统的记录及再现方面较为详尽的研究报道. 本文首先从理论上对等曲率物参光像面数字全息的记录和再现过程进行分析, 然后讨论影响分辨率的因素及系统成像特点, 并给出位相畸变补偿的方法, 最后通过实验进行验证.

## 2 全息图的记录及数值再现分析

### 2.1 全息图记录技术及特点分析

图 1 为等曲率物参光像面数字全息显微记录

\* 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: F2008000750, F2010001038)、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: pbxyingzi@126.com

光路示意图. 由 He-Ne 激光器发出的波长为 632.8 nm 的激光经偏振分束棱镜 PBS 后分为两束, 并分别经扩束-滤波-准直系统后, 一束形成照明样品的平面光波, 并经显微物镜 MO<sub>1</sub> 后形成放大的物光波, 另一束经显微物镜 MO<sub>2</sub> 后形成发散的球面参考光波, 两束光经棱镜 BS 合束后发生干涉, 并被位于样品像平面的 CCD 传感器所记录, 随后送往计算机进行处理. 为了消除 MO<sub>1</sub> 引入的二次位相畸变, MO<sub>2</sub> 应与 MO<sub>1</sub> 完全相同, 并须精确调整其位置, 使平行光经它们后所形成的球面光波相对 CCD 有完全相同的波面弯曲. 同时需要精调棱镜 BS 的倾角, 使所记录的全息图频谱沿对角线方向分离. 具体调节方法如下: 首先, 挡住参考光, 调节物平面到显微物镜的距离及 CCD 位置, 使物体被放大合适的倍数并在 CCD 中成清晰的像. 然而, 由于衍射效应使像平面难以准确确定, 但我们发现, 若在物光路中放入一张普通擦镜头纸, 可使光的衍射大大削弱, 此时便可以精确确定像平面位置. 其次, 物光路中不放样品, 精调 MO<sub>2</sub> 的位置, 使所记录的全息图条纹及重建位相分布均为平行等间距直条纹.

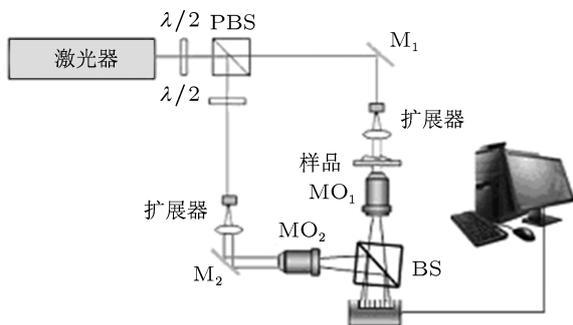


图1 等曲率物参光像面数字全息记录光路示意图

为便于分析, 建立如图 2 所示的坐标系统, 其中, 显微物镜已用单透镜等效表示. 物平面、MO<sub>1</sub> 平面及 CCD 平面分别用  $(x_0, y_0)$ ,  $(x_\phi, y_\phi)$  及  $(x, y)$  表示 (图中  $y_0, y_\phi$  和  $y$  三个坐标轴未画出),  $z$  轴沿系统的光轴方向并通过以上三个平面的中心,  $d_0, f$  和  $d_i$  分别为物距、显微物镜焦距和像距. 在图 1 中, 物光与参考光在进入 BS 之前, 其主光束相互垂直, 而棱镜 BS 相对于光轴有一个小角度倾斜 (倾斜角  $\theta$  约为  $2^\circ-3^\circ$ ), 结果使参考光主光束相对于物光主光束产生同样的倾斜, 从而实现离轴记录. 在图 2 中, 我们令 MO<sub>2</sub> 相对于 MO<sub>1</sub> 倾斜同样的角度  $\theta$  (图中  $\theta$  被放大了), 而 BS 不发生倾斜, 从而达到与图 1 中完全一样的效果.

为了完全抵消 MO<sub>1</sub> 引入的二次位相畸变, 须使平面光波经 MO<sub>1</sub>, MO<sub>2</sub> 后所形成的球面光波相对 CCD 具有相同的弯曲, 也即使图 2 中 MO<sub>2</sub> 的焦点  $F_2$  在光轴上的投影点与 MO<sub>1</sub> 的焦点  $F_1$  重合.  $F_2$  点的坐标可以表示为  $(x-x_r, y-y_r, d_i-f)$ , 其中  $x_r, y_r$  的大小决定了全息图  $\pm 1$  级谱与 0 级谱分离的程度.

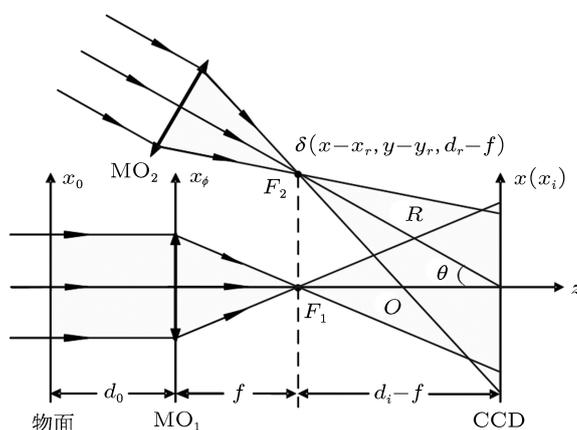


图2 所采用的坐标系

根据菲涅耳衍射公式, 略去无关紧要的常数位相因子, 当物光路中不放物体时, MO<sub>1</sub> 后表面的光场复振幅分布为

$$U(x_\phi, y_\phi) = A(x_\phi, y_\phi) \exp\left[-\frac{jk}{2f}(x_\phi^2 + y_\phi^2)\right] \times P(x_\phi, y_\phi), \quad (1)$$

式中  $A(x_\phi, y_\phi)$  为物光路中照明样品的平面光波振幅, 根据数字全息术的特点, 不失一般性, 通常设其为 1. 若设 MO<sub>1</sub> 的孔径半径为  $R$ , 则

$$P(x_\phi, y_\phi) = \text{circ}\left(\sqrt{x_\phi^2 + y_\phi^2}/R\right) = \text{circ}(r/R)$$

为其孔径函数. 则 CCD 平面的物光波复振幅为

$$O(x, y) = \exp\left[\frac{jk}{2d_i}(x^2 + y^2)\right] \times \iint_{\infty} U(x_\phi, y_\phi) \exp\left[\frac{jk}{2d_i}(x_\phi^2 + y_\phi^2)\right] \times \exp\left[-j2\pi\left(\frac{x}{\lambda d_i}x_\phi + \frac{y}{\lambda d_i}y_\phi\right)\right] dx_\phi dy_\phi. \quad (2)$$

对于理想成像情况,  $P(x_\phi, y_\phi) = 1$ , 则有

$$O(x, y) = \exp\left[\frac{jk}{2d_i}(x^2 + y^2)\right]$$

$$\begin{aligned} & \times \text{FT} \left\{ \exp \left[ \frac{jk}{2} \left( \frac{1}{d_i} - \frac{1}{f} \right) (x_\phi^2 + y_\phi^2) \right] \right\} \Big|_{f_x = \frac{x}{\lambda d_i}, f_y = \frac{y}{\lambda d_i}} \\ & = O_0 \exp \left[ \frac{jk}{2(d_i - f)} (x^2 + y^2) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $O_0 = \sqrt{j\lambda d_i / (f - d_i)}$ , “FT” 表示二维傅里叶变换. 同理, 参考光在 CCD 平面形成的光波场复振幅为

$$R(x, y) = R_0 \exp \left\{ \frac{jk}{2(d_i - f)} [(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2] \right\}, \quad (4)$$

其中  $R_0$  为参考光在 CCD 平面的振幅. CCD 平面干涉条纹强度分布为

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

将  $R(x, y)$ ,  $O(x, y)$  的表达式代入上式, 得到

$$H(x, y) = R_0^2 + O_0^2 + 2R_0O_0 \cos \Delta\varphi, \quad (6)$$

其中

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda(d_i - f)} (x_r x + y_r y - x_r^2 - y_r^2)$$

为物光与参考光之间的位相差分布, 由此可以求出全息图条纹的局部空间频率分布

$$f_x = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial x} = \frac{x_r}{\lambda(d_i - f)}, \quad (7a)$$

$$f_y = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial y} = \frac{y_r}{\lambda(d_i - f)}. \quad (7b)$$

可见, 条纹空间频率与全息图平面坐标  $(x, y)$  无关, 即对于一个确定的记录系统, 全息图条纹空间频率为定值, 表明等曲率物参光像面数字全息图为平行等间距的直条纹分布, 这同时意味着, 与其他数字全息记录光路相比, 等曲率物参光像面数字全息记录系统具有最大的信息容量.

## 2.2 全息图数值再现及特点分析

为了分析的简洁性, 暂不考虑 CCD 有限的光敏面尺寸及像元的抽样影响. 理论和实验已经证明<sup>[15]</sup>, 对于球面参考光像面数字全息图来说, 需要采用准直平面光波进行再现. 像面数字全息图记录的是物体的放大像, 且全息图记录距离为零, 菲涅耳衍射不成立. 角谱算法没有最小再现距离的限制<sup>[18]</sup>, 又可以很方便地用于频域滤波处理, 因此, 采用角谱算法对像面数字全息图进行数值再现是恰当的. 对全息图进行傅里叶变换, 然后滤除 0 级及共轭像频谱, 从而得到原始像光场的复振幅分布

$$U_{+1}(x, y) = \text{FT}^{-1} \{ \text{FT} [H(x, y)] \}_{\text{Fil}}$$

$$= R^*(x, y) O(x, y), \quad (8)$$

式中 “FT<sup>-1</sup>” 表示二维逆傅里叶变换, 角标 “Fil” 表示频谱滤波. 代入 (3), (4) 式, 得到

$$U_{+1}(x, y) = A \exp \left[ \frac{-jk}{d_i - f} (x_r x + y_r y) \right], \quad (9)$$

式中

$$A = R_0 O_0 \exp \left[ \frac{-jk}{2(d_i - f)} (x_r^2 + y_r^2) \right].$$

同样可得到共轭像光场的复振幅分布, 它与原始像光场有类似的形式. 对于确定的记录系统, (9) 式中除  $x, y$  之外, 其余参量均为定值, 因此, 再现像光场发生了一次位相畸变, 表明在不放被测物体时, 重建像光场的位相为平行等间距直条纹分布.

由以上分析可知, 可以根据不放物体时所记录的全息图条纹及再现的位相分布是否为平行直条纹来精调参考光路中显微物镜的位置, 以确保再现像光场中二次位相因子的彻底消除.

## 3 等曲率物参光像面数字全息系统的点扩散函数及成像特点

### 3.1 系统的点扩散函数

现在研究图 1 所示系统对物平面上坐标为  $(\xi, \eta)$  处的单位振幅点光源  $\delta(x_0 - \xi, y_0 - \eta)$  的响应. 根据菲涅耳衍射公式, MO<sub>1</sub> 后表面的物光场复振幅为

$$\begin{aligned} U(x_\phi, y_\phi) &= \exp \left\{ -\frac{jk}{2d_0} [(x_\phi - \xi)^2 + (y_\phi - \eta)^2] \right\} \\ &\times \exp \left[ -\frac{jk}{2f} (x_\phi^2 + y_\phi^2) \right] P(x_\phi, y_\phi). \end{aligned} \quad (10)$$

将上式代入 (2) 式, 并利用透镜成像的高斯公式  $1/d_0 + 1/d_i = 1/f$ , 计算、整理后得到 CCD 平面的物光波复振幅为

$$\begin{aligned} O_\delta(x, y) &= \exp \left[ \frac{jk}{2d_0} (\xi^2 + \eta^2) \right] \exp \left[ \frac{jk}{2d_i} (x^2 + y^2) \right] \\ &\times \iint_{-\infty}^{\infty} \text{circ} \left( \frac{\sqrt{x_\phi^2 + y_\phi^2}}{R} \right) \\ &\times \exp \left\{ -j2\pi \left[ \left( \frac{x}{\lambda d_i} + \frac{\xi}{\lambda d_0} \right) x_\phi \right. \right. \\ &\left. \left. + \left( \frac{y}{\lambda d_i} + \frac{\eta}{\lambda d_0} \right) y_\phi \right] \right\} dx_\phi dy_\phi \\ &= R^2 E(x, y; \xi, \eta) \frac{J_1 [2\pi R \rho]}{R \rho}, \end{aligned} \quad (11)$$

式中  $E(x, y; \xi, \eta)$  是积分号前的指数函数,  $J_1[\ ]$  为一阶贝塞尔函数,  $M = -d_i/d_0$  为像的放大倍率,  $\rho$  表示极坐标系中的空间频率, 在此其取值为

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \\ &= \frac{1}{\lambda d_i} \sqrt{(x - M\xi)^2 + (y - M\eta)^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

参考光的复振幅分布见 (4) 式. 设 CCD 沿两个相互垂直方向的像元尺寸及光敏面尺寸分别为  $\Delta x, \Delta y$  和  $L_x, L_y$ , 填充因子为  $\alpha, \beta$  ( $\alpha, \beta \leq 1$ ), 则 CCD 所记录的全息图分布如下:

$$\begin{aligned} H_D(x, y) &= \left[ H(x, y) \otimes \text{rect} \left( \frac{x}{\alpha \Delta x}, \frac{y}{\beta \Delta y} \right) \right] \\ &\times \text{comb} \left( \frac{x}{\Delta x}, \frac{y}{\Delta y} \right) \cdot \text{rect} \left( \frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

式中“ $\otimes$ ”表示卷积运算.

根据上述像面数字全息图的再现原理, 并代入 (4) 和 (11) 式, 可得到原始像光场的复振幅分布, 即系统的点扩散函数为

$$\begin{aligned} \text{PSF}_{+1}(x, y) &= [R^*(x, y) O_\delta(x, y)] \\ &\otimes \text{rect} \left( \frac{x}{\alpha \Delta x}, \frac{y}{\beta \Delta y} \right) \\ &\times \text{comb} \left( \frac{x}{\Delta x}, \frac{y}{\Delta y} \right) \cdot \text{rect} \left( \frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y} \right) \\ &= A' \left\langle \left\{ \exp \left[ \frac{jk}{d_i - f} (x_r x + y_r y) \right] \right. \right. \\ &\quad \times \left. \left. \frac{J_1[2\pi R\rho]}{R\rho} \right\} \otimes \text{rect} \left( \frac{x}{\alpha \Delta x}, \frac{y}{\beta \Delta y} \right) \right\rangle \\ &\quad \times \text{comb} \left( \frac{x}{\Delta x}, \frac{y}{\Delta y} \right) \cdot \text{rect} \left( \frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y} \right), \end{aligned} \quad (14)$$

其中,  $A'$  为复常数. 上述推导中已经将  $\xi = -d_0/d_i x$ ,  $\eta = -d_0/d_i y$  的关系代入 (11) 式中的  $E(x, y; \xi, \eta)$ .

### 3.2 系统的成像分辨率

根据上述分析, (14) 式中的指数函数表明像光场存在一次位相畸变, 需作校正;  $J_1[2\pi R\rho]/R\rho$  决定了 MO 的成像分辨率, 其值为  $\Delta x = 0.610\lambda/NA$ ; 卷积运算反映的是 CCD 像元的平均效应, 其作用是模糊原始光场;  $\text{comb}(\ )$  函数的作用是离散抽样, 对再现像的分辨率影响甚微; 后面的  $\text{rect}(\ )$  函数的作用是限制 CCD 记录的光场范围, 由于 CCD 位于  $\text{MO}_1$  的像面上, 因此,  $x, y$  方向上可记录的物体尺寸  $L_{ox}, L_{oy}$  与像的放大倍率  $M$  及 CCD 光敏面尺寸

$L_x, L_y$  之间有如下关系:

$$L_{ox} \leq \frac{L_x}{M}, \quad L_{oy} \leq \frac{L_y}{M}. \quad (15)$$

由于 CCD 记录的是物体的像光场, 且显微成像的分辨率通常在亚微米量级, 因此, 在 CCD 可记录的范围, 各点发出的通过  $\text{MO}_1$  的所有频率成分均被 CCD 完整地记录下来, 因此, CCD 窗口函数  $\text{rect}(x/L_x, y/L_y)$  对再现像的分辨率没有影响.

然而, 由于数值再现过程中需要进行频域滤波, 这可能会对再现像带来一定影响. 从频域来分析, 全息图的频谱为

$$\begin{aligned} A(f_x, f_y) &= \text{FT} \left\{ H(x, y) \text{rect} \left( \frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y} \right) \right\} \\ &= L_x L_y \text{FT} \{ H(x, y) \} \\ &\quad \otimes \text{sinc}(L_x f_x) \text{sinc}(L_y f_y), \end{aligned} \quad (16)$$

上式中两个  $\text{sinc}$  函数的主瓣半宽分别为  $1/L_x$  和  $1/L_y$ , 因此, CCD 光敏面尺寸越小, 零级及正、负一级频谱扩展得越厉害, 若滤波时透明窗口选取范围太小, 或记录时 0 级与  $\pm 1$  级谱分离不完全, 再现像的分辨率及像质会受到一定影响.

可见, 等曲率物参光像面数字全息显微系统的成像分辨率取决于所用 MO 的成像分辨率、CCD 像元大小及其填充因子, 而与 CCD 的光敏面尺寸无关. 选用高数值孔径 MO 和小像元尺寸及低填充因子 CCD, 可获得高分辨率再现像.

在 (14) 式中, 若  $\alpha \Delta x \rightarrow 0$ ,  $\beta \Delta y \rightarrow 0$ , 则  $\text{rect} \left( \frac{x}{\alpha \Delta x}, \frac{y}{\beta \Delta y} \right) \rightarrow \delta(x, y)$ , (14) 式变为

$$\begin{aligned} \text{PSF}_{+1}(x, y) &= A' \exp \left[ \frac{jk}{d_i - f} (x_r x + y_r y) \right] \\ &\quad \times \frac{J_1[2\pi R\rho]}{R\rho} \\ &\quad \times \text{comb} \left( \frac{x}{\Delta x}, \frac{y}{\Delta y} \right) \cdot \text{rect} \left( \frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y} \right). \end{aligned} \quad (17)$$

可见, 这种情况下系统的成像分辨率仅取决于 MO 的数值孔径.

### 3.3 系统的成像特点

图 3 是图 1 所示记录光路中物光路部分的示意图, 其中  $d_0, f$  和  $d_i$  的意义同前.

由图 3 可见, 当 CCD 位于  $\text{MO}_1$  的像面位置时, CCD 可以记录的物体区域为 AB, AB 之间各点发出的能够通过  $\text{MO}_1$  的各种空间频率成分的光波均

可以被 CCD 记录下来 (EF 为 CCD 的光敏面尺寸), 而位于 AB 区域之外的其他点所发出的光波均不能被 CCD 记录. 而当 CCD 位于  $MO_1$  的像面位置之前时 (像前预放大), CCD 可以记录到 AB 区域外的其他点发出的光波, 但只记录了这些光波中的部分频率成分. 当 CCD 位于  $MO_1$  像面位置之后时 (像后预放大), CCD 能够记录完整信息的物体区域小于 AB 范围. 可见, 像面数字全息术具有以下优点: 对于物体上的任意一点, 只要其信息能够通过 MO 并成像于记录平面, 那么该点通过 MO 的所有频率

成分都能被 CCD 接收; 而对于通过 MO 但没有被 CCD 记录的各点, 其光波场对于全息图的记录及再现像毫无影响, 这意味着像面数字全息记录中不必对物体被照明区域的大小进行限制, 这给全息图的记录带来了极大的方便. 而预放大数字全息术, 则不能保证成像区域中各点发出的所有通过 MO 的频率成分均被 CCD 接收. 因此, 等曲率物参光像面数字全息术能够实现高质量成像, 是一种优化的全息记录与再现系统.

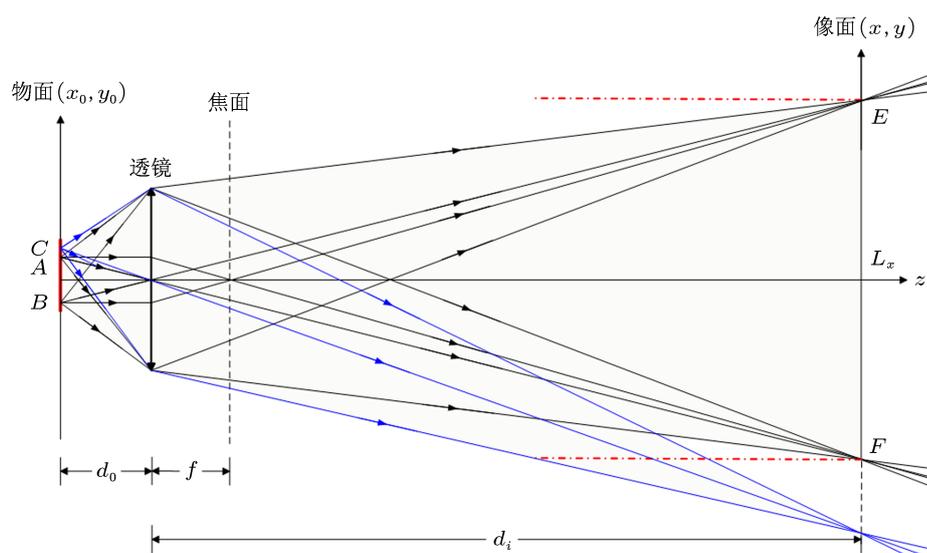


图3 显微镜成像光路及 CCD 记录放大像示意图

#### 4 像光场的一次位相畸变补偿

根据上面的分析, 由等曲率物参光像面数字全

息显微术得到的重建像光场存在一次位相畸变, 当对位相信息进行重建时, 必须对此畸变加以消除或补偿.

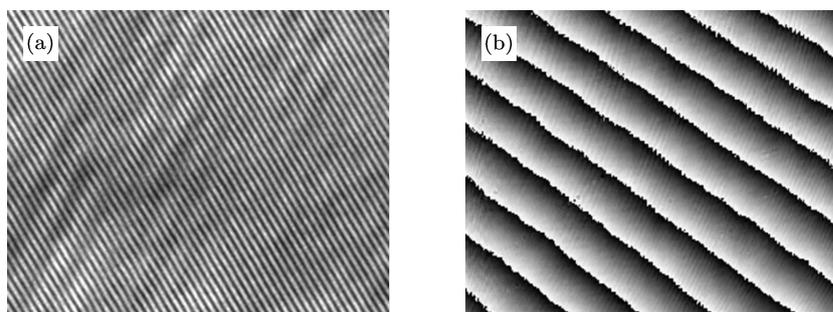


图4 无样品时全息图及原始像包裹位相分布 (a) 全息图部分放大图; (b) 包裹位相分布

像光场的一次位相畸变比其它的高次位相畸变要容易补偿得多. 目前, 常用的方法主要有: 双曝光法<sup>[15]</sup>、自动位相补偿法<sup>[19]</sup>、频移法<sup>[20]</sup>和平均法. 双曝光法的缺点是: 对系统的稳定性及操作技能要求很高, 且不能用于实时成像.

频移法对噪声非常敏感, 通常情况下不能准确获得频谱中心坐标值, 误差较大. 平均法是利用再现光场位相的线性变化性质, 对样品附近平坦区域的位相分布分别沿水平和竖直方向求偏导, 然后分别求出其平均值, 得到一次位相畸变分布,

再与原始位相分布相减, 即可得到无畸变的位相分布. 由于噪声的影响, 这样求得的位相与实际偏离较远. 自动位相补偿方法虽然也是利用了平坦区域的位相数据, 同样也会受到噪声的影响, 但由于在利用 Matlab 软件进行数据拟合时采用了

最小二乘法, 使拟合得到的系数很接近于真实值. 对于噪声较严重的情况, 可以采取迭代的方法来逐渐逼近真实值, 因而该方法是目前较为实用的位相畸变补偿方法. 其具体步骤详见文献 [19].

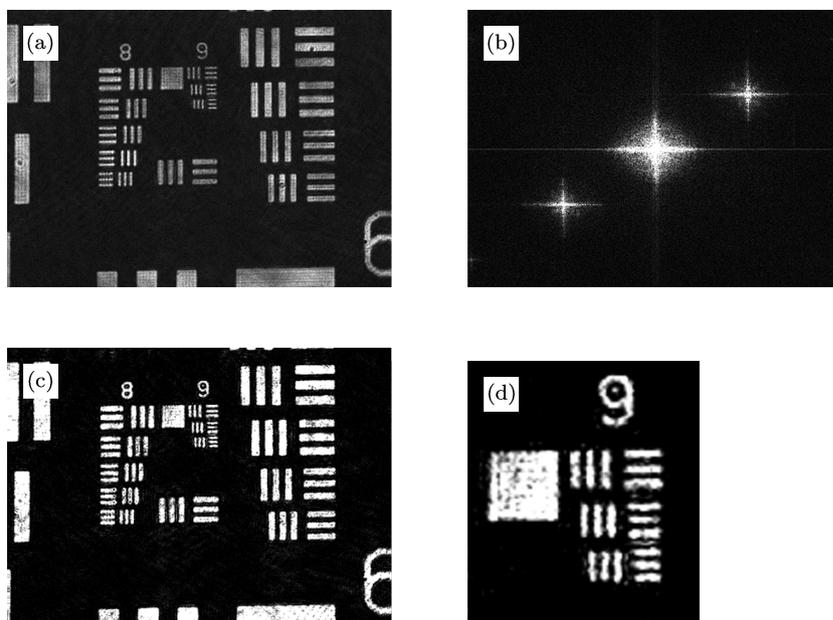


图5 分辨率板 USAF1951 的实验结果 (a) 全息图; (b) 全息图频谱; (c) 强度再现像; (d) 图 (c) 的部分放大

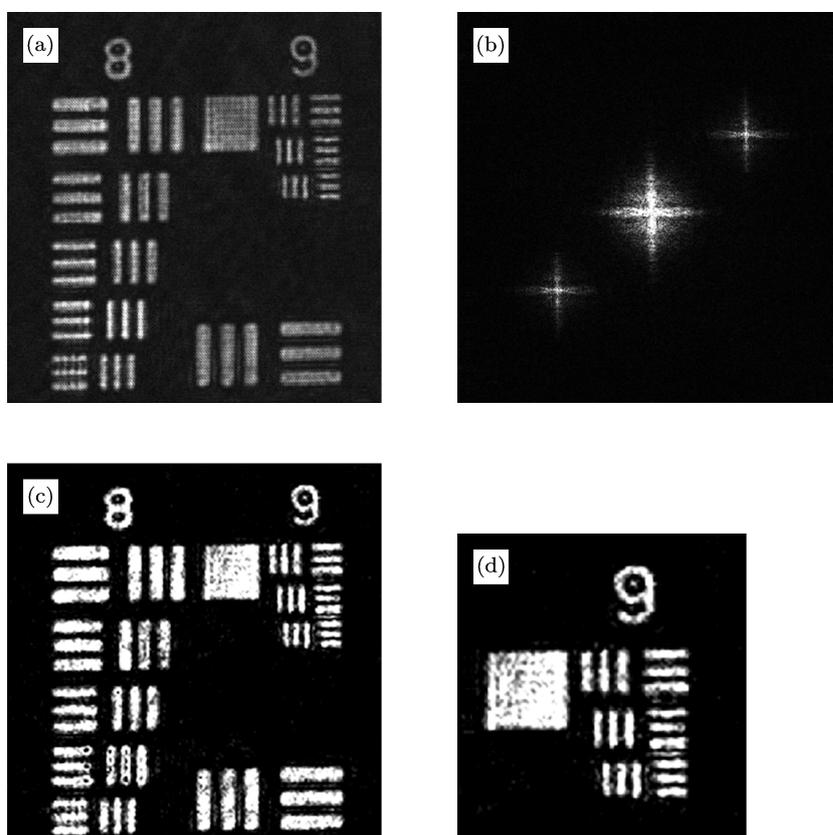


图6 裁剪后的全息图及其重建结果 (a) 裁剪后的全息图; (b) 频谱分布; (c) 强度再现像; (d) 图 (c) 的部分放大图

## 5 实验结果及讨论

为了验证上述理论分析的正确性, 采用图 1 所示光路进行了如下实验. 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;

$\text{MO}_1$  和  $\text{MO}_2$  放大倍率为 40, 数值孔径为 0.65, 焦距 4.65 mm.

图 4 是无样品时所记录的全息图的部分放大及原始像光场的位相重建结果. 两幅图中的条纹均为平行等间距直条纹分布, 表明了上述理论分析的正确性.

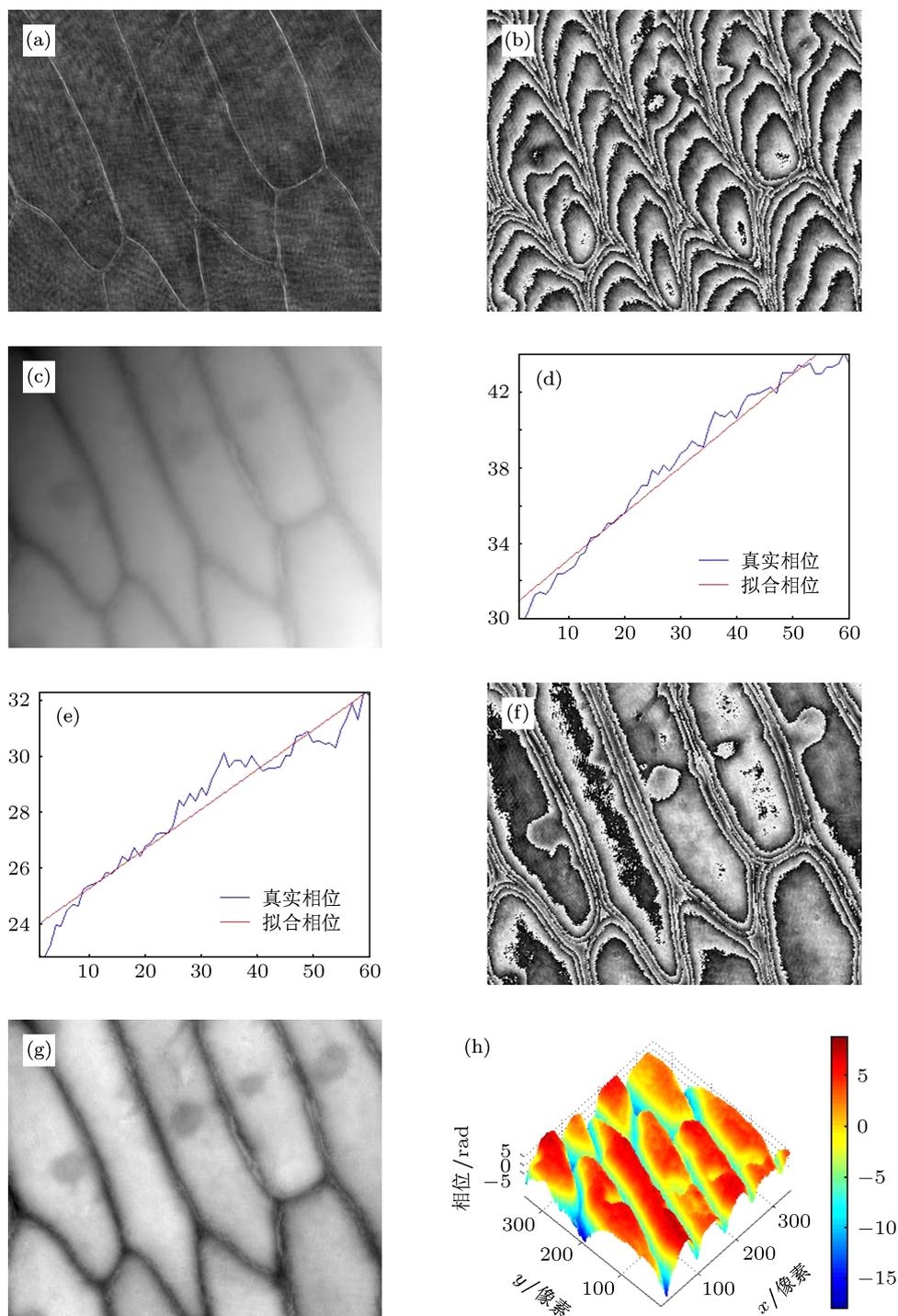


图 7 洋葱细胞的实验结果 (a) 全息图; (b) 包裹位相; (c) 展开相位; (d), (e)  $x, y$  方向拟合曲线; (f), (g) 畸变校正后的包裹位相及展开位相; (h) 位相的三维分布

图 5 是利用图 1 所示实验光路对美国空军分辨率测试板记录的全息图及其强度再现像. 其中, 图 5(a) 是全息图, 图 5(b) 是 (a) 的频谱图, 图 5(c) 是由角谱算法重建的强度像, 图 5(d) 是 (c) 的部分放大图. 由图 5(d) 可见, 此分辨率板最精细的结构 9.3 组被清晰再现, 该组线条宽度为  $0.78 \mu\text{m}$ , 表明系统的成像分辨率超过了  $0.78 \mu\text{m}$ .

图 6 是对图 5(a) 所示的全息图裁剪后的全息图及其再现结果. 图 6(b), (c) 分别是全息图频谱及其强度再现像, 图 6(d) 是 (c) 的放大图. 比较图 5(d) 与图 6(d), 可见两幅图几乎无差异, 说明全息图裁剪前后得到的再现像分辨率没有变化. 这一方面表明了等曲率物参光像面数字全息系统的成像分辨率与 CCD 光敏面尺寸无关, 同时也表明了物体被照亮的区域大小对再现像质量没有影响.

利用所建立的系统对洋葱细胞进行全息记录, 结果如图 7(a) 所示. 图 7(b) 是位相重建后得到的包裹位相图, 图 7(c) 是其解包裹位相, 可以看到整体的线性位相倾斜. 在图 7(c) 右下角的一个细胞上沿水平和竖直方向分别提取位相数据, 然后利用自动位补偿方法进行相畸补偿, 图 7(d), (e) 分别沿两个方向的拟合结果. 由此求出一次位相畸变掩膜, 并

与畸变位相相减, 即可求出畸变校正后的包裹位相和解包裹位相, 如图 7(f), (g) 所示. 图 7(h) 是图 (g) 的三维显示. 与利用双曝光法得到的结果进行比较后可知, 细胞的一次位相畸变得到了较好的校正.

## 6 结论

本文通过理论分析与实验验证相结合的方法, 研究了等曲率物参光像面数字全息图的记录与再现方法和技巧, 推导了系统的点扩散函数, 并由此对系统的成像分辨率及成像特点进行了分析, 给出了一次位相畸变的补偿方法. 结果表明: 等曲率物参光像面数字全息图由于具有平行等间距的直条纹分布特点, 因而具有最高的信息容量; 该系统的成像分辨率取决于所用 MO 的数值孔径及 CCD 记录器件的像元尺寸, CCD 光敏面尺寸大小对再现像的分辨率没有影响; 同时, 该系统能够完整地记录成像区域中各点通过 MO 的所有频率成分, 并且记录过程中不必对样品被照明区域的大小进行限制, 因此, 等曲率物参光像面数字全息显微术实现了对全息图的便捷记录 and 高质量重建, 是一种优化的全息记录系统.

- [1] Kemper B, Bally G V 2008 *Appl. Opt.* **47** A52
- [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] Olfatnia M, Singh V R, Xu T, Miao J M, Ong L S 2010 *J. Micromech. Microeng* **20** 085013
- [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] Barth R, Staier F, Simpson T, Mittler S, Eisebitt S, Grunze M 2010 *J. Biotechnol.* **149** 238
- [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] Wang H Y, Zhao B Q, Song X F 2009 *Acta Optica Sinica* **29** 374 (in Chinese) [王华英, 赵宝群, 宋修法 2009 光学学报 **29** 374]
- [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] Park Y K, Popescu G, Badizadegan K 2006 *Opt. Exp.* **14** 8263
- [17] Ikeda Liu T 2005 *Opt. Lett.* **30** 1165
- [18] Kim M K 2010 *SPIE Reviews* **1** 018005
- [19] Colomb T, Cuche E, Charrière F 2006 *Appl. Opt.* **45** 851
- [20] 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]

# High-quality digital image-plane micro-holographic system with the same wavefront curvature of reference and object wave\*

Wang Hua-Ying<sup>1)2)†</sup> Liu Fei-Fei<sup>1)</sup> Song Xiu-Fa<sup>2)</sup> Liao Wei<sup>1)</sup> Zhao Bao-Qun<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 26 May 2012; revised manuscript received 16 July 2012)

## Abstract

The digital image-plane holographic microscopy which has the same curvature radius in the object light path and the reference light path is studied for the first time to our knowledge. The configuration of this setup is analyzed and built. The point spread function of this system is derived. The factors corresponding to the imaging resolution and the imaging characteristics of this system are analyzed. The method to correct the linear phase distortion in the reconstructed optical field is discussed. The results show that this system has the largest information content, and the imaging resolution of the system is dependent on the numerical aperture of the microscope objective (MO) and on the CCD pixel size, but independent of the photosensitive surface size of the CCD. All frequency components of each point in the object wave which has passed through the MO can completely be recorded and reconstructed. And the size of illuminated region of object has no influence on the recording condition and the quality of the reconstructed image. The digital image-plane holographic microscopy with the same curvature radius in the object light path and the reference light path is an optimized holographic recording system, which can achieve high-quality imaging. The experimental results demonstrate the correctness of the theoretical analysis.

**Keywords:** digital holographic microscopy, digital image-plane holography, spherical reference wave, resolution

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

**DOI:** 10.7498/aps.62.024207

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61077001, 61144005), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant Nos. F2008000750, F2010001038), the Key Technology Research and Development Program of Hebei Province (Grant No. 09277101D, ZH2011241).

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