

数字全息多平面成像技术研究

周 皓, 顾济华, 陈大庆

(苏州大学 物理与光电能源学部, 江苏 苏州 215006)

摘 要: 提出了一种新的数字全息多平面成像技术: 将非共轭二次扭曲位相因子作用于实验记录的数字全息图, 只需一次菲涅尔衍射便可同时对多个成像平面进行重建。首先介绍了非共轭二次扭曲位相因子多平面成像原理, 然后开展实验验证了方法有效性。此方法只需记录一幅处于多个不同平面物体的数字全息图, 依据该理论选择合适参数, 可在任意位置重建多个平面再现像。采用均方根误差 (RMSE) 与峰值信噪比 (PSNR) 作为图像质量评价标准, 比较了不同再现距离的成像质量。文中提出方法在无需对光路进行对称设计的前提下, 可同时对多个平面进行数字聚焦, 延拓了菲涅尔数字全息重建图像的焦深。

关键词: 数字全息; 多平面成像; 非共轭二次扭曲位相

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0513-06

Multi-plane imaging in digital holography

Zhou Hao, Gu Jihua, Chen Daqing

(College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: A novel method for multi-plane imaging in digital holography was proposed. A non-conjugated quadratic distorted phase factor was used to act on the experimental recorded digital hologram and the reconstructed images at multiple planes would be obtained simultaneously by only single Fresnel diffraction. It was firstly introduced the principles for multi-plane imaging using non-conjugated quadratic distorted phase factor and the effectiveness of the proposed method was verified by experiments. It needed single digital hologram of objects at different positions and multi-plane images could be rebuilt at arbitrary reconstruction distance by selecting the suitable parameters according to this paper's theory. The root mean square error (RMSE) and peak signal to noise ratio (PSNR) were used for evaluation standard of the image quality and reconstructed images at different positions were compared. Digital focusing at multi-planes can be achieved simultaneously without the symmetric optical design on the premise and the depth of focus for the Fresnel digital holographic reconstruction images can be extended.

Key words: digital holography; multi-plane imaging; non-conjugated quadratic distorted phase factor

收稿日期: 2014-06-05; 修订日期: 2014-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(11304216)

作者简介: 周皓(1982-), 男, 实验师, 博士生, 主要从事光信息处理, 数字全息方面的研究。Email: zhouhao@suda.edu.cn

导师简介: 顾济华(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光信息处理, 光学测量方面的研究。Email: jhqu@suda.edu.cn

0 引言

数字全息技术通过干涉将物光波的位相信息转化为条纹强度,数字再现时选择不同的重建距离即可对不同成像平面进行观测。这一特性克服了采用机械扫描方式需要记录多幅图像耗时较长且较难记录动态物体的不足,因而在生物活体显微术,光学信息加密,三维物体信息存储等领域中得到了广泛的应用^[1-5]。

然而,数字全息技术也受到焦深的限制。对于菲涅耳全息,其焦深正比于 $\frac{\lambda d^2}{L^2}$,其中 λ 为记录光波长, d 为记录距离, L 为 CCD 靶面尺寸(假设靶面为正方形);而对于像面数字全息显微技术,焦深则正比于 $\frac{\lambda}{NA^2}$,其中 NA 为显微物镜数值孔径^[6]。因此,每次重建过程只能对焦深范围内的物体进行清晰重构,而焦深范围之外则表现为模糊的离焦像。这给诸如医学影像技术、波前传感、光学传播研究等需要同时对多个平面进行观测的应用领域带来了一定的困难^[7]。

近年来,诸多学者提出了实现多平面成像的方法:B.Javidi 等人采用了图像融合法,首先对多个平面的物体分别进行重构,然后进行图像融合^[8];P.J.Verveer 等人将微透镜阵列运用于多平面物体成像^[9];P.Ferraro 等通过分析不同重建距离的位相分布获得焦深拓展的物体重建像^[10]。这些方法均可有效重构多个平面再现像,但图像融合法与位相分析法需要对全息图进行多次数值重建,计算量较为繁复;而微透镜阵列制造工艺较为复杂且存在局限性^[8-10]。

Blanchard 与 Greenaway 提出将经过位相扭曲的二值光栅与凸透镜进行组合,成功将光栅三个衍射级次成像于同一平面^[11]。P.Ferraro 等又将这一理论运用于数字全息显微技术中,采用计算机产生的二次扭曲余弦光栅作用于记录的数字全息图,使三个不同平面的像得到同时再现^[12]。此方法仅需对全息图进行一次重建,且由于采用计算机生成扭曲光栅,因此记录系统相比 Blanchard 与 Greenaway 的记录光路更为灵活。

然而,由于余弦光栅是由共轭位相进行叠加组合,因此全息图再现时需要选择关于 ± 1 级对称平面(0 级重建距离为 +1 级与 -1 级重建距离之和的一

半),给光路设计提出了较为严格的要求。文中采用非共轭二次扭曲位相将 +1 级与 -1 级分别衍射不同距离实现数字全息多平面成像。记录时,可任意选择物体所处位置,再现时选择不同参数即可一次在任意距离对多平面进行重建。首先介绍了采用非共轭二次扭曲位相进行多平面成像的原理,然后开展对宏观物体的数字全息实验以验证方法有效性。

1 非共轭二次扭曲位相多平面成像原理

为了实现数字全息多平面成像,P.Ferraro 等人发展了由 Blanchard 与 Greenaway 提出的二次扭曲光栅理论,由计算机生成了扭曲余弦光栅,其表达式如下:

$$T = P_1 + P_2 \cos[a(x^2 + y^2) + b(x + y) + c] \quad (1)$$

式中: P_1 、 P_2 可控制 0 级与 ± 1 级重建像的对比度; a 为离焦参数,使 0 级与 ± 1 级同时在同一平面成像; b 为间隔参数,保证三个不同级次重建像在空间分开; c 为延迟参数,调节物光和参考光之间的位相延迟。

依据欧拉公式,公式(1)可展开为两个共轭位相与常数之和:

$$T = P_1 + \frac{1}{2} P_2 \exp\{i[a(x^2 + y^2) + b(x + y) + c]\} + \frac{1}{2} P_2 \{-i[a(x^2 + y^2) + b(x + y) + c]\} \quad (2)$$

由二次扭曲光栅理论^[9]可知,扭曲的余弦光栅可对关于 ± 1 级对称平面同时成像,再现像中 0 级, ± 1 级均清晰可见^[12]。但是,在公式(1)中只能选取一组 a 、 b 、 c 参数,因此此方法不能同时在任意平面进行全息图清晰重构,且依据文中实验部分讨论可知,此对称平面也不一定为成像的最佳平面。

为了能在任意位置同时观察多个数字全息再现像,文中提出的非共轭二次扭曲位相由公式(3)给出:

$$\Phi(x, y) = P_1 + P_2 \exp\{i[a_1(x^2 + y^2) + b_1(x + y) + c_1]\} + P_3 \exp\{-i[a_2(x^2 + y^2) + b_2(x + y) + c_2]\} \quad (3)$$

式中:参数 P_1 、 P_2 、 P_3 可分别控制 0 级与 ± 1 级重建像的对比度; a_1 、 a_2 使距成像平面不同距离的 ± 1 级同时成像(其中 a_1 控制 +1 级衍射光成像, a_2 控制 -1 级衍射光成像); b_1 、 b_2 为间隔参数,保证三个不同级次重建像在空间分开; c_1 、 c_2 为延迟参数,调节物光和参考光之间的位相延迟。与公式(2)相比,公式(3)中可依据不同重建平面选择两组不同的参数 a_1 、 b_1 、 c_1 与 a_2 、

b_2, c_2 , 使 ± 1 级像在任意指定平面清晰重建。

将此位相因子作用于离轴菲涅耳重建系统, 则系统的传递函数为:

$$\begin{aligned}
 H_1(f_x, f_y) = & \mathcal{L} \left\{ \Phi(x, y) \exp \left[i \frac{\pi}{\lambda d_0} (x^2 + y^2) \right] \right\} = \\
 & \mathcal{L} \left\{ P_1 \exp \left[i \frac{\pi}{\lambda d_0} (x^2 + y^2) \right] + P_2 \exp \left[\left(a_1 + \frac{\pi}{\lambda d_0} \right) (x^2 + y^2) + \right. \right. \\
 & \left. \left. b_1(x+y) + c_1 \right] + P_3 \exp \left[\left(a_2 - \frac{\pi}{\lambda d_0} \right) (x^2 + y^2) + b_2(x+y) + c_2 \right] \right\} = \\
 & P_1 i \lambda d_0 \exp \left[-i \pi \lambda d_0 (f_x^2 + f_y^2) \right] + P_2 \frac{i \pi \lambda d_0}{\pi + a_1 \lambda d_0} \exp(i c_1) \\
 & \exp \left[i \lambda d_0 \frac{b_1^2 - 2b_1 \pi (f_x + f_y) + 2\pi^2 (f_x^2 + f_y^2)}{2(\pi + a_1 \lambda d_0)} \right] + P_3 \frac{i \pi \lambda d_0}{\pi - a_2 \lambda d_0} \\
 & \exp(-i c_2) \exp \left[i \lambda d_0 \frac{b_2^2 - 2b_2 \pi (f_x + f_y) + 2\pi^2 (f_x^2 + f_y^2)}{2(\pi - a_2 \lambda d_0)} \right] = \\
 & P_1 i \lambda d_0 \exp \left[-i \pi \lambda d_0 (f_x^2 + f_y^2) \right] + P_2 \frac{i \pi \lambda d_0}{\pi + a_1 \lambda d_0} \exp(i c_1) \\
 & \exp \left[-i \lambda d_0 \frac{\left(\sqrt{2} \pi f_x - \frac{b_1}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\sqrt{2} \pi f_y - \frac{b_1}{\sqrt{2}} \right)^2}{2(\pi + a_1 \lambda d_0)} \right] + \\
 & P_3 \frac{i \pi \lambda d_0}{\pi - a_2 \lambda d_0} \exp(-i c_2) \\
 & \exp \left[i \lambda d_0 \frac{\left(\sqrt{2} \pi f_x - \frac{b_2}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\sqrt{2} \pi f_y - \frac{b_2}{\sqrt{2}} \right)^2}{2(\pi - a_2 \lambda d_0)} \right] = \\
 & P_1 i \lambda d_0 \exp \left[-i \pi \lambda d_0 (f_x^2 + f_y^2) \right] + P_2 \frac{i \pi \lambda d_0}{\pi + a_1 \lambda d_0} \exp(i c_1) \exp \\
 & \exp \left[-i \lambda \pi d_0 \frac{\left(\sqrt{2\pi} f_x - \frac{b_1}{\sqrt{2\pi}} \right)^2 + \left(\sqrt{2\pi} f_y - \frac{b_1}{\sqrt{2\pi}} \right)^2}{2(\pi + a_1 \lambda d_0)} \right] + \\
 & P_3 \frac{i \pi \lambda d_0}{\pi - a_2 \lambda d_0} \exp(-i c_2) \\
 & \exp \left[i \lambda d_0 \frac{\left(\sqrt{2\pi} f_x - \frac{b_2}{\sqrt{2\pi}} \right)^2 + \left(\sqrt{2\pi} f_y - \frac{b_2}{\sqrt{2\pi}} \right)^2}{2(\pi - a_2 \lambda d_0)} \right] \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中: d_0 为离轴菲涅耳数字全息系统重建距离(0 级位置); f_x, f_y 为空间频率; $\mathcal{L}\{\}$ 表示傅里叶变换。由公式(4)可知, 该系统的传递函数分为三项: 第一项为 d_0 位置聚焦情况下的系统频谱; 第二、三项为 d_0 位置离焦情况的系统频谱, 此时系统的频谱产生了缩放与平移。若略去相位延迟项, 仅考虑与位置有关的频谱项 $\exp[-i \pi \lambda d_0 (f_x^2 + f_y^2)]$ 、

$$\exp \left[-i \pi \lambda d_0 \frac{\left(\sqrt{2\pi} f_x - \frac{b_1}{\sqrt{2\pi}} \right)^2 + \left(\sqrt{2\pi} f_y - \frac{b_1}{\sqrt{2\pi}} \right)^2}{2(\pi + a_1 \lambda d_0)} \right]、$$

$$\exp \left[i \pi \lambda d_0 \frac{\left(\sqrt{2\pi} f_x - \frac{b_2}{\sqrt{2\pi}} \right)^2 + \left(\sqrt{2\pi} f_y - \frac{b_1}{\sqrt{2\pi}} \right)^2}{2(\pi - a_2 \lambda d_0)} \right]$$

并与菲涅耳衍射系统的传递函数标准形式($\exp[-i \pi \lambda d_0 (f_x^2 + f_y^2)]$)比较, 则两个离焦像的偏离位置分别为:

$$\begin{aligned}
 \Delta d_1 = \frac{\pi d_0}{\pi + a_1 \lambda d_0} - d_0 = \frac{-a_1 \lambda d_0^2}{\pi + a_1 \lambda d_0} \quad (+1 \text{ 级}) \\
 \Delta d_2 = \frac{\pi d_0}{\pi - a_2 \lambda d_0} - d_0 = \frac{a_2 \lambda d_0^2}{\pi - a_2 \lambda d_0} \quad (+1 \text{ 级}) \quad (5)
 \end{aligned}$$

由公式(5)可得:

$$\begin{aligned}
 a_1 = \frac{-\pi \Delta d_1}{\lambda d_0 (d_0 + \Delta d_1)} \\
 a_2 = \frac{\pi \Delta d_2}{\lambda d_0 (d_0 + \Delta d_2)} \quad (6)
 \end{aligned}$$

考虑到 $d_1 = d_0 + \Delta d_1, d_2 = d_0 + \Delta d_2, d_1, d_2$ 为两次重建清晰像所对应的重建距离, 公式(6)可以转化为:

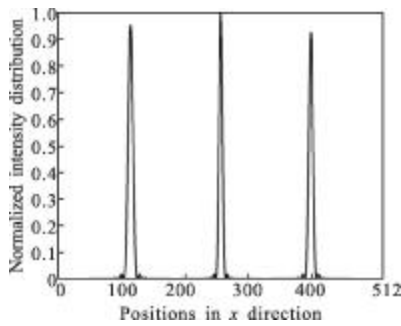
$$\begin{aligned}
 a_1 = \frac{-\pi \Delta d_1}{\lambda d_0 d_1} \\
 a_2 = \frac{-\pi \Delta d_2}{\lambda d_0 d_2} \quad (7)
 \end{aligned}$$

式中: a_1 可以控制 +1 级衍射光成像; a_2 则控制 -1 级衍射光成像。

图 1(a) 为计算机模拟采用非共轭二次扭曲相位成像系统的点扩展函数。图像大小为 512 pixels × 512 pixels, 波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$, 采样间隔为 $\Delta x = 3.45 \mu\text{m}, \Delta y = 3.45 \mu\text{m}$ 衍射距离取 0.8 m。图像中心偏移量为 0 时的点扩展函数, 左下方与右上方分别为取 $a_1 = 1.007 \times 10^6, a_2 = -4.027 \times 10^6$ 时得到的点扩展函数。图 1(b) 为三个级次的归一化强度分布。由图 1(b) 可知, 不同级次所对应的点扩展函数中心强度不同, 这将影响各级重建像的强度分布。采用文中方法的重建像与直接重



(a) 模拟非共轭二次扭曲相位点扩展函数
(a) Simulated point spread function of non-conjugated quadratic distorted phase factor



(b) 三个级次的归一化强度分布

(b) Normalized intensity distribution of three orders

图 1 模拟非共轭二次扭曲相位点扩展函数分布

Fig.1 Simulated point spread function of non-conjugated quadratic distorted phase factor

建像不存在二次扭曲像差,只存在位置的平移,而这是由公式(3)中的一次项 $\exp\{-ib_1(x+y)\}$ 与 $\exp\{-ib_2(x+y)\}$ 造成。

2 实验

2.1 数字全息图的记录与再现

为了验证该方法的有效性,对不同位置的宏观物体进行离轴菲涅尔数字全息记录。由于数字全息像面显微术所采用显微镜工作距离有限,因此选择对宏观物体进行数字全息记录重建距离范围更广,能更好地说明该方法适用性。图 2 为数字全息记录光路图,由 Ar^+ 激光器($\lambda=532\text{ nm}$)发出的光由分束镜(BS1)分为两束:一束经反射镜 M1 反射后扩束,照明所需记录的物体。记录物体为骰子(记录距离为 36.5cm)与硬币(记录距离为 69.1cm)。另外一束光经 M2 反射后扩束准直成平行光与物光干涉后由 CCD 记录数字全息图。CCD 像元尺寸为 $\Delta x=3.45\ \mu\text{m}$, $\Delta y=3.45\ \mu\text{m}$,所记录的全息图尺寸为 $1024\ \text{pixels}\times 1024\ \text{pixels}$ 。

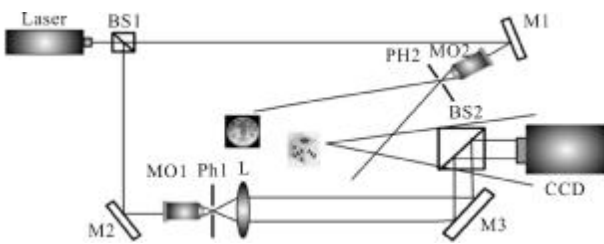
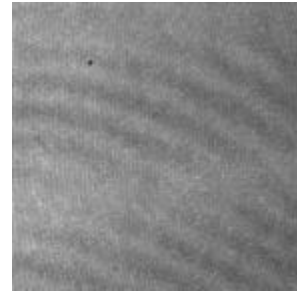


图 2 数字全息多平面三维物体记录光路图

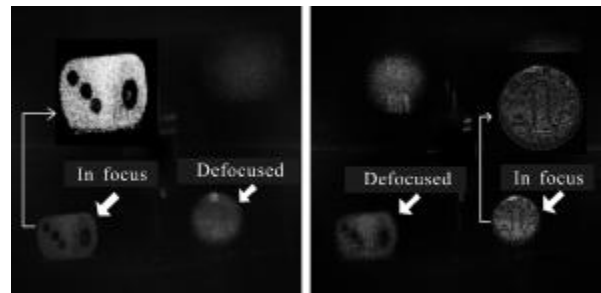
Fig.2 Experimental scheme designed for multi-plane 3D objects digital holographic recording

图 3(a)为 CCD 所采集的数字全息图,选择不同的重建距离采用离散菲涅尔衍射公式得到骰子与硬币的数字重建像(图 3(b)与图 3(c))。由图 3(b)与图 3(c)可见,传统方法单次菲涅耳衍射只能对一个平面成像(图 3(b)与图 3(c)中放大的像均经过强度调节)。



(a) 数字全息图

(a) Digital hologram



(b) $d=36.5\text{ cm}$ 处骰子的重建图像 (c) $d=69.1\text{ cm}$ 处硬币的重建图像

(b) Reconstructed image of the coin at $d=36.5\text{ cm}$

(c) Reconstructed image of the coin at $d=69.1\text{ cm}$

图 3 数字全息图与不同距离的重建图像

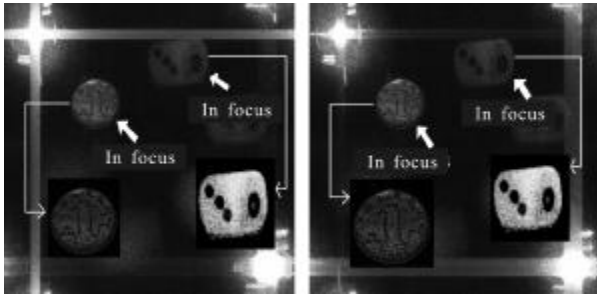
Fig.3 Digital hologram and reconstruction image at different distance

2.2 非共轭二次扭曲位相多平面成像

依据观察平面所在位置,利用公式(3)生成非共轭二次扭曲位相因子,并作用于所记录的数字全息图进行一次菲涅尔重建,便可在同一观察平面对不同位置物体进行清晰成像。图 4(a)~(f)为选择不同重建距离得到的全息图再现像。

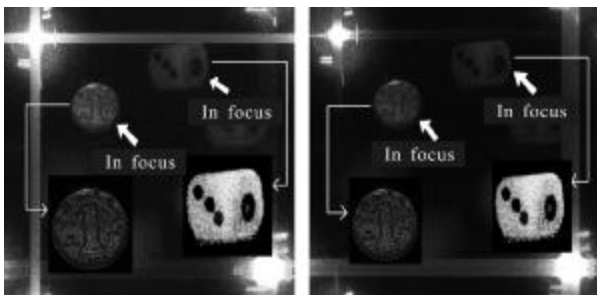
由图 4 可知,依据公式(7)选择合适的 a_n 值可在任意重建距离采用一次菲涅尔衍射进行不同平面物体重构。图 4(a)为重建距离小于任一物体重建距离: $a_1=-8.2529\times 10^{-6}\text{ m}^2$, $a_2=9.9103\times 10^{-5}\text{ m}^2$; 图 4(b)为重建距离等于物体 1 的重建距离: $a_1=0$, $a_2=9.0850\times 10^{-5}\text{ m}^2$; 图 4(c)为重建距离位于两物体重建距离之间: $a_1=5.1993\times 10^{-5}\text{ m}^2$, $a_2=3.8856\times 10^{-5}\text{ m}^2$; 图 4(d)为重建距离等于两物体重建距离之和的一半: $a_1=$

5.944 8×10⁻⁵ m⁻², a₂=3.140 2×10⁻⁵ m⁻²; 图 4(e)为重建距离等于物体 2 的重建距离: a₁=9.085 0×10⁻⁵ m⁻², a₂=0; 图 4(f)为重建距离大于任一物体重建距离: a₁=9.215 7×10⁻⁵ m⁻², a₂=-1.307 8×10⁻⁶ m⁻²。图 4 中放大的物体均经过强度调节。



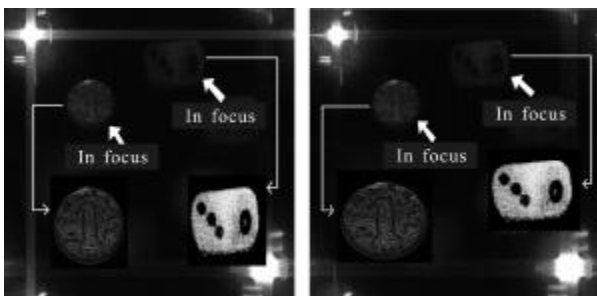
(a) d=35 cm 处的重建图像
(a) Reconstructed image at d=35 cm

(b) d=36.5 cm 处的重建图像
(b) Reconstructed image at d=36.5 cm



(c) d=50 cm 处的重建图像
(c) Reconstructed image at d=50 cm

(d) d=52.8 cm 处的重建图像
(d) Reconstructed image at d=52.8 cm



(e) d=69.1 cm 处的重建图像
(e) Reconstructed image at d=69.1 cm

(f) d=70 cm 处的重建图像
(f) Reconstructed image at d=70 cm

图 4 不同距离一次菲涅耳衍射的重建图像

Fig.4 Reconstructed images at different distances using one Fresnel transform

为了使各物体再现像在空间上分离从而不影响再现图像质量,可对参数 b_n 进行调节:选择不同的 b_1 与 b_2 值可使各物体的再现图像沿图像对角线方向

平行移动。为了满足各物体重建图像不产生混叠,参数 b_n 可以有多种选择,实验中取 $b_1=b_2=10$ 。

选择不同的重建距离 d_0 , 所获得再现像的强度不同。为了提高图像对比度,依据重建图像光强分布与重建距离成平方反比关系,选取不同的对比度调节参数 P_2, P_3 。

将直接再现图像图 3(b)与图 3(c)中的清晰物体(未经强度调节) 分别作为参考图像,采用归一化均方根误差(RMSE)与归一化峰值信噪比(PSNR(作为图像的客观标准评价不同再现距离图像质量, RMSE 值越小, PSNR 值越大说明图像质量越好。表 1 给出了不同再现距离的图像的 RMSE 与 PSNR 值。

表 1 不同距离重建图像的归一化 RMSE 与 PSNR 值
Tab.1 Normalized RMSE and PSNR of reconstructed image at different distances

Reconstructed distance /cm	Normalized RMSE of object 1 (the dice)	Normalized PSNR of object 1 (the dice)	Normalized RMSE of object 2 (the coin)	Normalized PSNR of object 2 (the coin)
35	0.892	0.997	1	0.977
36.5	0.888	1	0.987	0.981
50	0.905	0.965	0.943	0.995
52.8	0.951	0.957	0.941	0.996
69.1	0.998	0.927	0.927	1
70	1	0.926	0.933	0.998

图 5(a)-(d)分别为物体 1 与物体 2 的归一化 RMSE 值与归一化 PSNR 值曲线图。由图 5 可知:对应不同成像距离,所得图像质量有所差别;在某一物体清晰成像距离采用文中方法进行多平面成像,对应位置物体的 RMSE 值最小, PSNR 值最大(如:在 36.5 cm 处进行多平面成像,则物体 1(骰子)的成像质量最好)成像质量最好;重建距离与清晰成像距离相差越小,则与该清晰成像位置所成像越接近。

与参考文献[12]提出采用二次扭曲余弦光栅进行数字全息多平面成像方法相比,文中提出的方法可以任意选择重建距离,无需采用参考文献[12]提出的对称平面重建。这一突出优势使文中方法在无需对光路进行对称设计的前提下,同时对多个平面进行数字聚焦,延拓重建系统的焦深。此外,文中的方

法还具有同时对三个或者三个以上平面进行成像的潜力,这将在以后的工作中予以详细介绍。

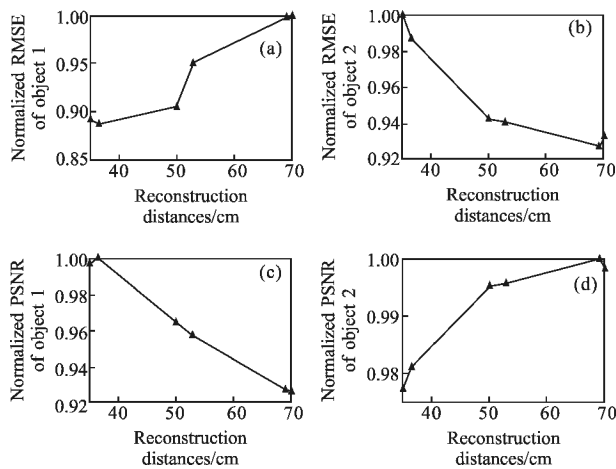


图 5 两个物体不同距离重建的归一化 RMSE 与 PSNR 值

Fig.5 Normalized RMSE and PSNR of two objects at different distances

3 结论

文中将非共轭二次扭曲位相因子作用于实验记录的数字全息图,只需一次菲涅尔衍射便可同时对多个成像平面进行重建。适当选择非共轭二次扭曲位相因子参数,可在任意位置对多个平面的数字全息再现像进行重建。采用 RMSE 与 PSNR 作为图像质量评价标准,比较了不同再现距离的成像质量。该方法对于生物活体显微技术,波前传感,医学影像等具有重要意义。

参考文献:

- [1] Ortyń W E, Perry D J, Venkatachalam V, et al. Extended depth of field imaging for high speed cell analysis [J]. *Cytometry A*, 2007, 71(4): 215-231.
- [2] Westphal V, Rizzoli S O, Lauterbach M A, et al. Video-rate far-field optical nanoscopy dissects synaptic vesicle movement[J]. *Science*, 2008, 320(5873): 246-249.
- [3] Rosen J, Brooker G. Non-scanning motionless fluorescence three-dimensional holographic microscopy [J]. *Nat Photon*, 2008, 2(3): 190-195.
- [4] Zhao Jie, Wang Dayong, Wang Huaying, et al. Measurement of geometrical parameters of microstructure with digital holography[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 173-176. (in Chinese)
赵洁, 王大勇, 王华英, 等. 用于微结构几何量测量的数字全息方法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S): 173-176.
- [5] Gao Benli, Gu Jihua, Zhou Hao, et al. Pre-magnified off-axis Fresnel digital holographic microscopy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 706-710. (in Chinese)
高本利, 顾济华, 周皓, 等. 预放大离轴菲涅耳数字全息显微技术[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(4): 706-710.
- [6] Tkaczyk T S. *Field guide to microscopy* [C]//SPIE Press, 2009.
- [7] Ferraro P, Grilli S, Alfieri D, et al. Extended focused image in microscopy by digital holography [J]. *Opt Exp*, 2005, 13(18): 6738-6749.
- [8] Do C M, Javidi B. Multifocus holographic 3-D image fusion using independent component analysis[J]. *Journal of Display Technology*, 2007, 3(3): 326-332.
- [9] Verveer P J, Swoger J, Pampaloni F, et al. High-resolution three dimensional imaging of large specimens with light sheet-based microscopy[J]. *Nat Methods*, 2007, 4(4), 311-313.
- [10] Paturzo M, Ferraro P. Creating an extended focus image of a tilted object in Fourier digital holography [J]. *Opt Express*, 2009, 17(2): 20546-2055.
- [11] Blanchard P M, Greenaway A H. Simultaneous multiplane imaging with a distorted diffraction grating [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(32): 6692-6699.
- [12] Paturzo M, Finizio A, Ferraro P. Simultaneous multiplane imaging in digital holographic microscopy [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(1): 24-28.