

文章编号:1004-4213(2010)12-2168-6

基于滤波成像的大视角数字全息技术*

邓丽军,王辉[†],马利红

(浙江师范大学 信息光学研究所,浙江 金华 321004)

摘要:为提高数字全息再现像视角,提出一种基于滤波成像的数字全息技术来实现大视角的三维物体面型测量.利用离轴像面数字全息技术,通过在 4F 相干图像处理系统的空间频谱面处放置可移动的低通滤波器,使满足 CCD 分辨率的物光波与参考光波干涉形成全息图,并控制低通滤波及成像区域分别记录不同谱段的子全息图.再现时,首先对子全息图进行数字傅里叶变换,重构对应频谱段,并对频谱段进行拼接形成完整的物光频谱;而后通过数字再现获得大视角的数字全息再现像.利用该方法测量了圆柱形表面(光滑的缝纫针)的三维形貌,并取得了较好的实验结果.

关键词:数字全息技术;大视角;4F 系统;频谱拼接

中图分类号: TB87.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103912.2168

0 引言

数字全息最大的特点是可以对三维或相位物体的结构信息进行定量分析^[1-3],但是由于记录器件有限的像素数,使得全息图的高频信息不能被有效的记录,因而重构像的分辨率被限制.对面型检测而言,分辨率与视角相对应,或者说全息图视角问题的本质就是分辨率问题.另外,因为高频全息图欠采样或者无效采样,将降低全息图的信噪比.对于这些问题,不少研究者从不同的角度进行了探索,取得了很多有价值的进展^[4-10].增大再现视角和信噪比一个有效的方法是综合孔径技术(Synthetic Aperture)^[4-6,9],即记录物体多幅不同波矢量空间分量的子全息图,然后对各子全息图的再现光场进行复振幅叠加或强度叠加得到再现像.若要对物体面型或相位信息进行定量分析,必须采用复振幅叠加方法,这种方法要求各个再现光场有相对固定的相位关系,对记录系统的稳定性和 CCD 的位移准确度有着非常高的要求,如有误差,将增加数字修正的难度^[11-12].

本文提出利用 4F 相干图像处理系统记录数字全息图,在空间频谱面设置可移动的滤波孔,随着孔径的移动,记录不同谱段的子全息图.再现时,首先对子全息图进行数字傅里叶变换,重构对应的频谱段,并对频谱段进行拼接形成完整的物光频谱,最后对整个频谱再次进行傅里叶变换,从而获得像的重

构.根据傅里叶变换的相移性质,如果全息图在记录过程中发生了相位移动,其频谱将发生空间位移,这样可以直观的在谱面上反映出来,便于进行拼接修正.

1 频谱拼接大视角数字全息原理

1.1 记录光路分析

在图 1 的成像系统中,物体位于透镜 L_1 的前焦面, SF 是透镜 L_1 和 L_2 的共焦面,记录平面位于 L_2 的后焦面上,它类似于滤波成像的 4F 系统.设物面、 SF 面和记录平面 XY 坐标的下标分别为 o, sf 和 i ,物光波复振幅为 $u_o(x_o, y_o)$,在 SF 平面上的光场分布是

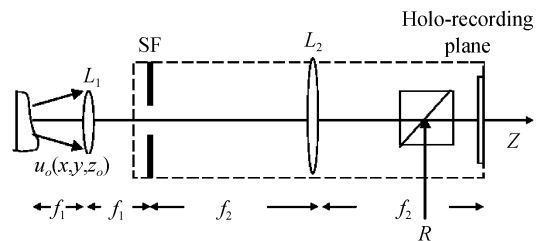


图 1 全息图记录示意图

Fig. 1 Sketch map of hologram recording

$$U_o(\xi_1, \eta_1) = F[u_o(x_o, y_o)] \quad (1)$$

式中, $\xi_1 = x_{sf} / \lambda f_1$, $\eta_1 = y_{sf} / \lambda f_1$

在频谱面上放置矩形孔滤波器,其中心保持与透镜 L_2 光轴同轴,虚框内系统可以整体平移.设矩形尺寸为 $w \times h$,随着平移,中心位置变化为

$$x_{sf_0n} = n\omega, y_{sf_0m} = mh$$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \pm N, m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \pm M$$

将频谱面上所有频谱分量都覆盖时,窗口移动

* 国家自然科学基金(60877002)和浙江省自然科学基金(Z1080030)资助

[†] Tel: 0579-82283118

Email: wh@zjnu.cn

收稿日期: 2010-05-13

修回日期: 2010-06-29

的次数为 $(2N+1) \cdot (2M+1)$. 矩形窗口对应的频率窗口函数为

$$F\omega_{nm}(\xi_1 - \xi_{10n}, \eta_1 - \eta_{10m}) = \text{rect}\left(\frac{\xi_1 - \xi_{10n}}{\xi_{1w}}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{\eta_1 - \eta_{10m}}{\eta_{1h}}\right) \quad (2)$$

式中, $\xi_{1w} = (\omega/2)/\lambda f_1$, $\eta_{1h} = (h/2)/\lambda f_1$, $\xi_{10n} = x_{sf_0n}/\lambda f_1$, $\eta_{10m} = y_{sf_0m}/\lambda f_1$, ξ_{1w} , η_{1h} 和 ξ_{10n} , η_{10m} 分别为矩形频率窗口大小及其中心频率.

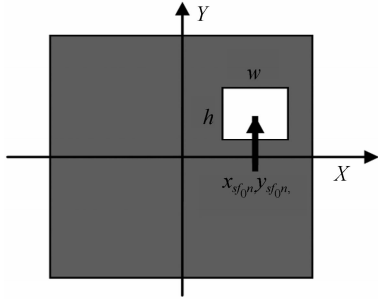


图2 矩形孔滤波器结构示意图

Fig. 2 Sketch map of rectangle filter structure

该区域内的频谱分布可以表达为

$$U_{WHnm}(\xi_1, \eta_1) = U_o(\xi_1, \eta_1) F\omega_{nm}(\xi_1 - \xi_{10n}, \eta_1 - \eta_{10m}) \quad (3)$$

由于 L_1 和 L_2 的焦距不同, 相对于由 L_2 形成的傅里叶变换系统, 式(3)应该写成

$$U_{WHnm}(\xi_2, \eta_2) = U_o(\xi_2, \eta_2) F\omega_{nm}(\xi_2 - \xi_{20n}, \eta_2 - \eta_{20m}) \quad (4)$$

式中, $\xi_2 = x_{sf}/\lambda f_2$, $\eta_2 = y_{sf}/\lambda f_2$, $\xi_{20n} = x_{sf_0n}/\lambda f_2$, $\eta_{20m} = y_{sf_0m}/\lambda f_2$

虚线框内所包含的是一可整体移动的傅里叶变换全息系统, 随着移动, 谱面的不同频谱分量的全息图可以被记录. 设整个频谱可以分解成 $(2N+1)$ $(2M+1)$ 个不重叠的窗口, 则谱面整个频谱分布可以写成

$$U(\xi_2, \eta_2) = \sum_{-N}^N \sum_{-M}^M U_o(\xi_2, \eta_2) F\omega_{nm}(\xi_2 - \xi_{20n}, \eta_2 - \eta_{20m}) \quad (5)$$

相对于透镜 L_2 而言, SF 平面坐标发生了平移, 新坐标与原坐标关系为

$$x'_{sf} = x_{sf} - x_{sf_0n}, y'_{sf} = y_{sf} - y_{sf_0m}$$

将上式关系带入式(4), 得到

$$U_{WHnm}(\xi'_2, \eta'_2) = U_o(\xi'_2 + \xi_{20n}, \eta'_2 + \eta_{20m}) \cdot F\omega(\xi'_2, \eta'_2) \quad (6)$$

公式 $\xi'_2 = x'_{sf}/\lambda f_2$, $\eta'_2 = y'_{sf}/\lambda f_2$, 此时, x'_{sf} , y'_{sf} 坐标原点就是窗口的中心, 窗口函数应该表示成

$$F\omega(\xi'_2, \eta'_2) = \text{rect}(\xi'_2/\xi_{2w}) \text{rect}(\eta'_2/\eta_{2h}) \quad (7)$$

并且: $\xi_{2w} = (\omega/2)/\lambda f_2$, $\eta_{2h} = (h/2)/\lambda f_2$

记录时整体移动虚框内的系统, 移动间隔为: 在

x 方向为 ω , 在 y 方向为 h . 每移动一次记录一幅全息图, 被记录的第 (n, m) 个全息图的物光波信息为

$$u_{imm}(x_i, y_i) = F\{U_o(\xi'_2 + \xi_{20n}, \eta'_2 + \eta_{20m}) \cdot F\omega(\xi'_2, \eta'_2)\} \quad (8)$$

全息图分布为

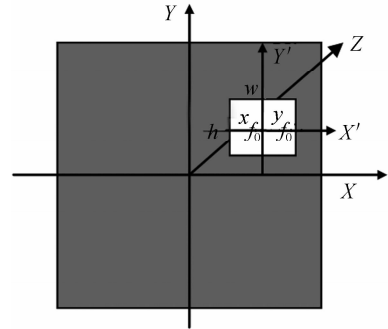


图3 频谱窗口示意图

Fig. 3 Sketch map of spectrum window

$$I(x_i, y_i) = |u_{imm}(x_i, y_i)|^2 + |R|^2 + Ru_{imm}^*(x_i, y_i) + R^* u_{imm}(x_i, y_i) \quad (9)$$

对式(9)乘以参考光 R , 并对其进行傅里叶逆变换, 即可得到物光波被记录的频谱.

$$U_{WHnm}(\xi'_2, \eta'_2) = U_o(\xi'_2 + \xi_{20n}, \eta'_2 + \eta_{20m}) \cdot F\omega(\xi'_2, \eta'_2) \quad (10)$$

对于所有的滤波窗口, 上式的频谱分量都是处于坐标中心的. 为了再现原物体的像, 必须对上式进行重新拼接. 拼接原理就是将上述频谱坐标平移 $-x_{sf_0n}$, $-y_{sf_0m}$, 新的坐标为

$$x''_{sf} = x'_{sf} + x_{sf_0n} = x_{sf}, y''_{sf} = y'_{sf} + y_{sf_0m} = y_{sf}$$

显然, 移动后式(8)又恢复成了式(4)

$$U_{WHnm}(\xi_2, \eta_2) = U_o(\xi_2, \eta_2) F\omega(\xi_2 + \xi_{20n}, \eta_2 - \eta_{20m})$$

对所有窗口频谱进行拼接, 重现 SF 平面的原频谱分布式(5)

$$U(\xi_2, \eta_2) = \sum_{-N}^N \sum_{-M}^M U_o(\xi_2, \eta_2) F\omega_{nm}(\xi_2 - \xi_{20n}, \eta_2 - \eta_{20m}) \quad (11)$$

对式(11)再次进行傅里叶变换即可得到重构像.

1.2 滤波窗口大小的选取

滤波窗口大小的选择应该保证其所形成的全息图能够被记录器件有效的记录. 设参考光为平行于 xz 平面的平行光且与 z 轴夹角为 θ , 则形成的全息图最大空间频率为

$$f_x = \xi_{2w} + \frac{\sin \theta}{\lambda} = \frac{\omega/2}{\lambda f_2} + \frac{\sin \theta}{\lambda} \quad (12)$$

设记录器件记录单元间隔为 d , 按照抽样定理, 理想的抽样要求抽样频率至少为干涉条纹频率的两倍, 即要求

$$\frac{1}{d} > 2 \left(\frac{\omega/2}{\lambda f_2} + \frac{\sin \theta}{\lambda} \right) \quad (13)$$

式中, $\frac{1}{d}$ 为记录器件抽样频率, $\frac{w/2}{\lambda f_2} + \frac{\sin \theta}{\lambda}$ 为干涉条纹频率即全息图频率. 或者对滤波孔的要求为

$$w \leq 2\lambda f_2 \left(\frac{1}{2d} - \frac{\sin \theta}{\lambda} \right) = \left(\frac{\lambda}{d} - 2\sin \theta \right) f_2 \quad (14)$$

滤波孔的最小值是零, 所以要求参考光夹角

$$\sin \theta \leq \frac{\lambda}{2d} \quad (15)$$

前文讨论没有考虑再现时零级光与再现像的分离条件, 如果采用相移技术, 分离条件可以不考虑. 就一般情况而言, 讨论分离条件还是很重要的. 根据按照式(8)要求设置滤波孔径, 结合式(5), 则物光的频谱宽度为

$$\xi_{2w} = \frac{w}{2\lambda f_2} = \frac{\left(\frac{\lambda}{d} - 2\sin \theta \right)}{2\lambda} = \frac{1}{2d} - \frac{\sin \theta}{\lambda} \quad (16)$$

根据零级光和再现像分离条件: $\frac{\sin \theta}{\lambda} \geq 3\xi_{2w} = 3\left(\frac{1}{2d} - \frac{\sin \theta}{\lambda} \right)$, 解之得

$$\sin \theta \geq 3\lambda/8d \quad (17)$$

结合式(9), 最后得到对参考光的要求为

$$\lambda/2d \geq \sin \theta \geq 3\lambda/8d \quad (18)$$

利用式(8), 可以求得对滤波孔径的限制为

$$0 \leq w \leq \frac{1}{4} \frac{\lambda}{d} f_2 \quad (19)$$

窗口的高度 h 方向不存在参考光问题, 所以从参照式(8), 可得

$$0 \leq h \leq (\lambda/d) f_2 \quad (20)$$

2 实验与结果分析

根据图1的原理设计实验光路如图4, 虚线框内系统固定在数控平台上并可在 X 轴(即水平方向)方向来回移动. 实验中使用 He-Ne 激光, 波长为 632.8 nm, 功率约为 60 mW. L_1 和 L_2 为双胶合透镜, 焦距分别为 50 mm 和 180 mm, 孔径分别为 30 mm 和 50 mm, 组成的 4F 相干图像处理系统的放大倍率约为 3.6 倍. BS_1 、 BS_2 和 BS_3 为分束镜,

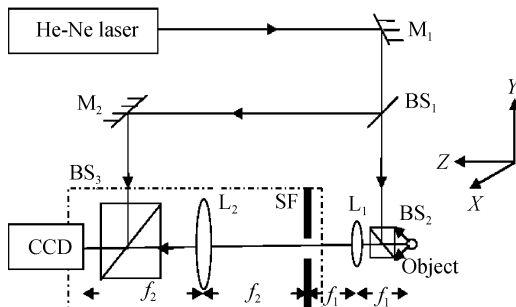


图4 实验光路
Fig. 4 Experimental setup

M_1 、 M_2 为反射镜. CCD 是由 PointGrey 公司生产的 Grasshopper-50S5 型, 像素数为 1024×1024 , 像敏单元尺寸为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$. 数控平台的型号是 Zolix TSA 300-B, 分辨率为 $2.5 \mu\text{m}$, 重复定位准确度: $< 3 \mu\text{m}$, 运动平行度和运动直线度分别为 $< 10 \mu\text{m}/100 \text{mm}$ 和 $< 15 \mu\text{m}/100 \text{mm}$.

记录物体是圆柱形表面(光滑的缝纫针), 半径为 $390 \mu\text{m}$, 用平行光照明针柱表面, 在 SP 面上形成了比较宽的谱分布, 空间频谱的宽度反映了物体表面可以被测的高度和宽度. 根据几何光学可以估算在此光学系统中, 被测物体的面型高度约为 $4.1 \mu\text{m}$, 面型宽度约为 $113.3 \mu\text{m}$. 采用离轴像面全息, 参考光为平行光, 参物夹角根据式(16)选为 4.2° , 滤波孔径根据式(17)和(18)选为 $5 \text{mm} \times 8 \text{mm}$ 以及 $8 \text{mm} \times 8 \text{mm}$.

图5是在没有采取滤波记录让所有频谱同时被记录的情况, 图5(a)是再现的谱, 图5(b)是其再现像, 显然由于谱和零级项发生了交叠, 再现像产生严重的畸变.

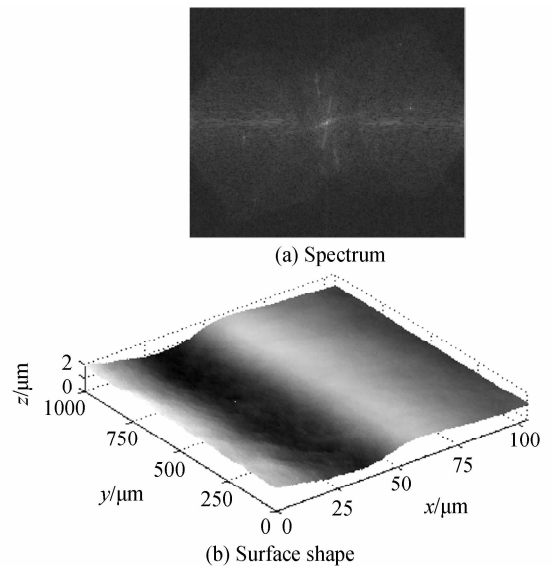


图5 频谱混叠未滤波结果

Fig. 5 Result from no filter with spectrum overlap

利用本文所提出的技术, 在记录过程中, 移动数控平台使得虚线框内系统在 X 轴方向(水平方向)移动, 当将频谱面上所有频谱分量都覆盖时, 移动结束. 若滤波孔径偏离频谱面较大, 其各个滤波孔径全息图的频谱大小将发生变化, 容易直观的观察, 从实验结果中可以看出这种偏离的影响是非常小的. $5 \text{mm} \times 8 \text{mm}$ 各滤波孔径的全息图再现分布如图6(a)~(c), 对应的面型分布再现像如图6, $8 \text{mm} \times 8 \text{mm}$ 各滤波孔径的全息图再现分布如图7(a)~(c), 对应的面型分布再现像如图7. 图6及图7中(d)~(f)实际上是圆柱面的各个部分, 从左侧

面到中间再到右侧面. 将 $5\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 和 $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 各个滤波孔径频谱进行拼接,重现 SF

平面的原频谱分布,而后数字再现获取的面型分布如图 8 和图 9. 面型高度分别为 $4.036\ \mu\text{m}$ 和 $3.983\ \mu\text{m}$.

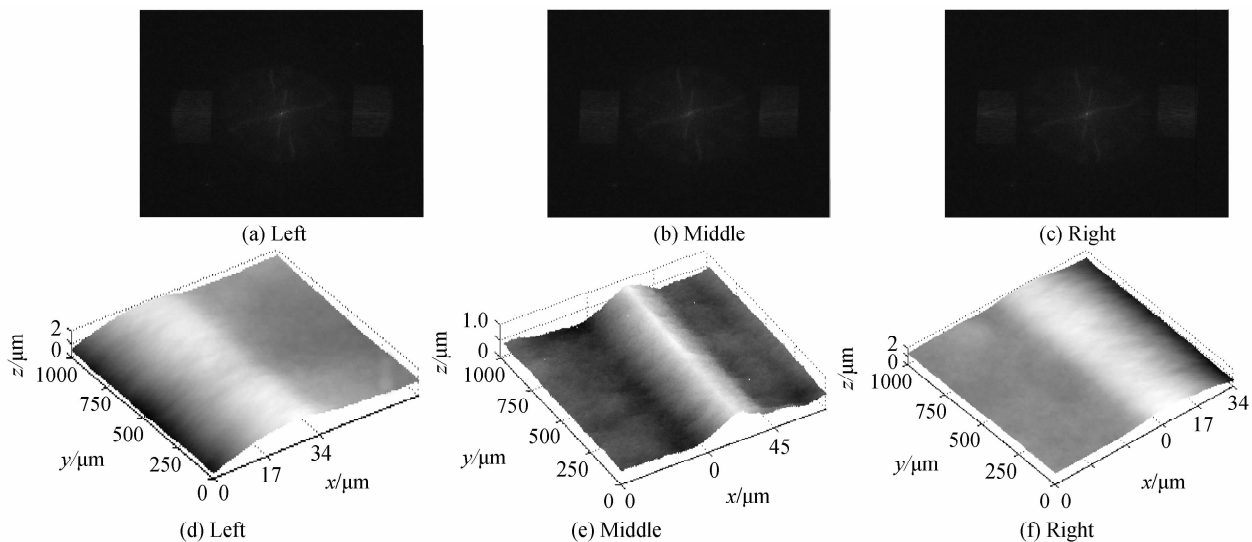


图 6 $5\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 各滤波孔径的频谱和再现面型分布

Fig. 6 Surface shape of each filter aperture for $5\text{ mm}\times 8\text{ mm}$

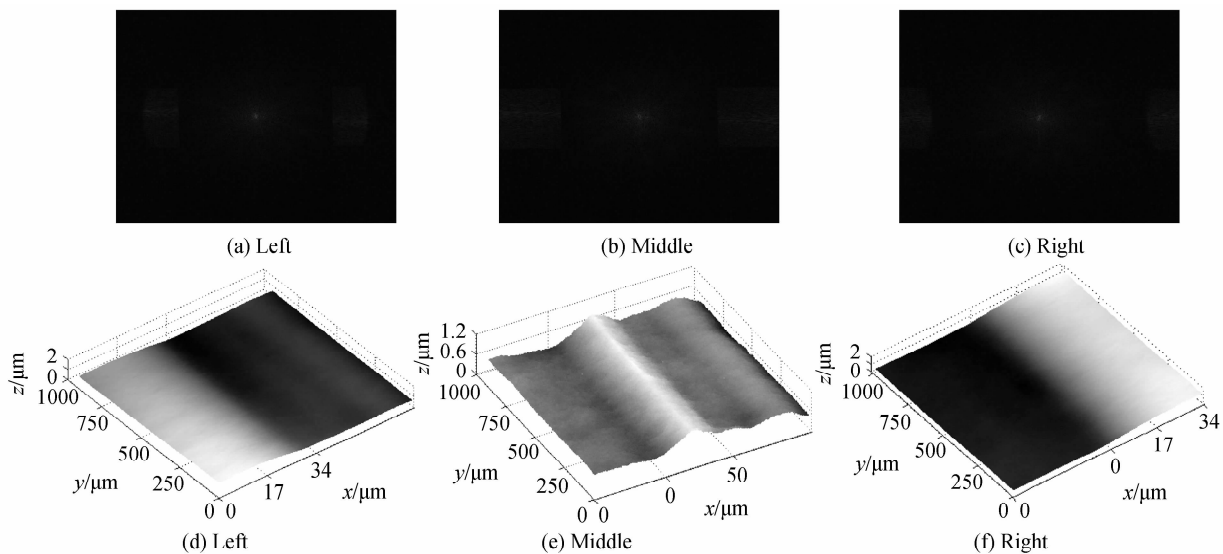


图 7 $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 各滤波孔径的频谱和再现面型分布

Fig. 7 Surface shape of each filter aperture for $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}$

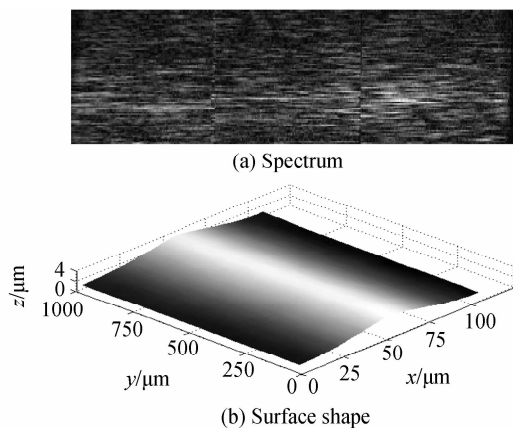
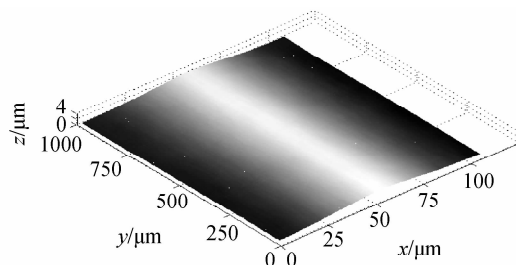


图 8 $5\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 的拼接结果

Fig. 8 Result of stitching for $5\text{ mm}\times 8\text{ mm}$

图 9 $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 的拼接结果

Fig. 9 Result of stitching for $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}$



按照信噪比公式

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{A_{\text{ideal}}}{A_{\text{noise}}} \right)^2 = 10 \log_{10} \left(\frac{A_{\text{ideal}}}{A_{\text{ideal}} - A_{\text{real}}} \right)^2 \quad (19)$$

式中 A_{ideal} 为理想面型分布, A_{noise} 为噪音分布, A_{real} 为实验获取的面型分布

计算可得 $5\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 和 $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 的拼接面型分布的信噪比为 $266.976\ 4\ \text{dB}$ 和 $265.576\ \text{dB}$.

由实验结果可以看出在满足记录器件抽样要求的情况下,滤波孔径的选择对再现像的影响不大,但从简化实验过程的角度出发,应根据频谱面频谱大小来选择合适的滤波孔径.

作为比较,不采用滤波记录,但改变参物夹角以使再现谱不重叠,因高频信息被截止且未被有效记录造成再现像信噪比下降,其再现像(图10)的面型高度下降为 $2.614\ \mu\text{m}$,并且信噪比降为 $254.557\ \text{dB}$.

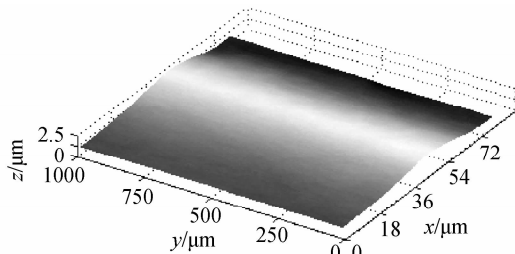


图10 满足分离条件未滤波的再现面型分布

Fig.10 Surface shape fulfill the condition of reconstructing separation with no filter

3 结论

本文提出了一种基于滤波成像的大视角数字全息技术,设计了以4F相干图像处理系统为基础的分谱数字全息记录装置,通过频谱拼接算法再现大视角再现像.以圆柱形表面为物体进行了实验得到了满意的结果.三维面型再现像的视角问题实际上是其空间频谱带宽问题,通过频谱拼接技术不但可以增大数字全息视角,同样可以提高再现像分辨率,增大视场.因而,本技术不论是对于宏观物体数字全息发展还是对于数字全息显微技术都有一定的参考意义.

参考文献

[1] KEMPER B, von BALLY G. Digital holographic microscopy for live cell applications and technical inspection[J]. *Appl Opt*, 2008, **47**(4): 52-61.

- [2] MARQUET P, RAPPAZ B, MAGISTRETTI P J, *et al.* Digital holographic microscopy: a noninvasive contrast imaging technique allowing quantitative Visualization of living cells with subwavelength axial accuracy[J]. *Opt Lett*, 2005, **30**(5): 468-470.
- [3] MANN C J, YU L F, LO C M, *et al.* High-resolution quantitative phase-contrast microscopy by digital holography[J]. *Opt Express*, 2005, **13**(22): 8693-8698.
- [4] Le CLERC F, GROSS M, COLLOT L. Synthetic-aperture experiment in the visible with on-axis digital heterodyne holography[J]. *Opt Lett*, 2001, **26**(20): 1550-1552.
- [5] MASSIG J H. Digital off-axis holography with a synthetic aperture[J]. *Opt Lett*, 2002, **27**(24): 2179-2181.
- [6] MICO V, ZALEVSKY Z, GARCIA-MARTINEZ P, *et al.* Synthetic aperture superresolution with multiple off-axis holograms[J]. *JOSA A*, 2006, **23**(12): 3162-3170.
- [7] INDEBETOUW G, TADA Y, ROSEN J, *et al.* Scanning holographic microscopy with resolution exceeding the Rayleigh limit of the objective by superposition of off-axis holograms[J]. *Appl Opt*, 2007, **46**(6): 993-1000.
- [8] MICO V, ZALEVSKY Z, FERREIRA C, *et al.* Superresolution digital holographic microscopy for three-dimensional samples[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(23): 19260-19270.
- [9] MARTINEZ-LEON L, JAVIDI B. Synthetic aperture single-exposure on-axis digital holography[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(1): 161-169.
- [10] CHOI Y S, LEE S J. Three-dimensional volumetric measurement of red blood cell motion using digital holographic microscopy[J]. *Appl Opt*, 2009, **48**(16): 2983-2990.
- [11] JIANG H Z, ZHAO J L, DI J L, *et al.* Numerically correcting the joint misplacement of the sub-holograms in spatial synthetic aperture digital Fresnel holography[J]. *Opt Express*, 2009, **17**(21): 18836-18842.
- [12] YU Ying-jie, CHEN Gang, DAI Cui-xia, *et al.* Application of phase stitching technique on digital holography[J]. *Acta photonic Sinica*, 2009, **38**(11): 2975-2979.
于瀛洁, 陈刚, 戴翠霞, 等. 相位拼接技术在数字全息中的应用[J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 2975-2979.

Digital Holographic Technique with Large Viewing Angle Based on Image Filter

DENG Li-jun, WANG Hui, MA Li-hong

(*Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China*)

Abstract: To generate digital holograms with a large viewing angle, a digital holographic technique based on filter imaging is proposed. Using the off-axis image plane holography, a low-pass filter is placed at the spatial frequency plane of the 4F coherent imaging system, in order to make the object wave (satisfied CCD resolution ratio) interfere with the reference wave, and the loss-pass filter and imaging areas are controlled to record the sub-holograms for different spectra in turn. In digital holographic reconstruction, all sub-holograms are carried on numerical Fourier transform, and the corresponding spectra are reconstructed which are also stitched to form a whole spectrum of object wave. Then, a large viewing angle reconstruction image can be obtained by digital holography. The proposed technique is applied to the three-dimensional profile measurement of a sewing needle, and the experimental results prove the accuracy of this technique.

Key words: Digital holographic technique; Large viewing angle; 4F system; frequency stitching



DENG Li-jun was born in 1985. Now he is pursuing his M. S. degree and his main research interests focus on the information optics and holography.



WANG Hui was born in 1958. He obtained his Ph. D. degree in 1993 from Sichuan University. Now he works at Zhejiang Normal University, and his research interests focus on the information optics and holography.