

文章编号: 1001-3806(2013)06-0736-06

## 基于傅里叶变换去隔行图像的动态3维面形测量

曹森鹏<sup>1</sup>, 王伟锋<sup>2</sup>, 薛喜昌<sup>1</sup>

(1. 平顶山学院 电气信息工程学院, 平顶山 467000; 2. 平顶山学院 现代教育技术中心, 平顶山 467000)

**摘要:** 为了解决动态面形测量中隔行扫描 CCD 相机记录动态物体表面变形条纹图像存在缺陷的问题, 提出了傅里叶变换去隔行算法, 即把隔行扫描 CCD 获取动态物体的错位模糊帧图像分成两个单场图像, 分别对每一单场图像进行傅里叶变换去隔行处理, 再利用条纹分析法重建对应时刻的3维面形。理论分析得出单场傅里叶变换去隔行图像与对应的准确满帧图像相同的结论。结果表明, 该方法可以很好地恢复条纹和重建物体, 且简单实用, 可用于基于空间相位检测、相位测量轮廓术、傅里叶变换轮廓术等条纹分析方法的动态物体3维测量中。

**关键词:** 信息光学; 动态测量; 傅里叶变换; 去隔行算法; 隔行扫描 CCD; 3维面形重建

中图分类号: TN247 文献标识码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.06.007

### Dynamic 3-D shape measurement based on de-interlaced images by Fourier transform

CAO Sen-peng<sup>1</sup>, WANG Wei-feng<sup>2</sup>, XUE Xi-chang<sup>1</sup>

(1. College of Electric and Information Engineering, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, China; 2. Center of Modern Education Technology, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, China)

**Abstract:** In order to eliminate imperfect fringes captured by an interlaced CCD camera when measuring a dynamic object, the Fourier transform de-interlacing algorithm was proposed. The blurring fringe pattern grabbed by the interlaced CCD is divided into two single-field images, each of which is processed into the restored frame image with this algorithm, then their corresponding 3-D shape were reconstructed by means of fringe analysis method. Theoretical analysis shows that the single-field image disposed by the Fourier transform de-interlacing algorithm is identical with the corresponding exact full frame image. The results of simulation and experiment demonstrate that the imperfect fringe patterns can be restored and real objects can be reconstructed with this method. The method is simple and practical, so it can be applied in 3-D shape measurement for dynamic objects based on spatial phase detection, phase measurement profilometry and Fourier transform profilometry.

**Key words:** information optics; dynamic process measurement; Fourier transform; de-interlacing algorithm; interlaced CCD; 3-D shape measurement

## 引言

动态面形测量尤其在高速和瞬态测量中, 为提高数据采集速率, 常采用隔行扫描方式采集图像, 但隔行扫描 CCD 相机由于先后采集奇偶两场图像以后再合成一帧图像, 对运动物体会因采集的两场图像相差一个场周期时间段, 使两场图像存在差别, 合成帧图像出现错位模糊, 存在一定的缺陷<sup>[1-2]</sup>。特别在研究高速运动物体成像时, 合成帧图像存在较明

显错位、垂直边缘锯齿化等问题; 直接利用错位模糊的帧条纹图像重建面形误差很大, 甚至错误。针对结构光照明变形条纹图像的特点, 结合视频去隔行技术<sup>[3]</sup>, 提出傅里叶变换去隔行算法: 把满帧图像分成奇场和偶场, 对每一单场图像进行傅里叶变化去隔行处理, 获得对应两个不同时刻的满帧图像。相对于逐行扫描的1帧动态图像只能重建一个时刻的面形, 该方法提高了采样时间, 使时间分辨率提高1倍。该方法在基于空间相位检测 (spatial phase detection, SPD)<sup>[4]</sup>、相位测量轮廓术 (phase measurement profilometry, PMP)<sup>[5-6]</sup>、傅里叶变换轮廓术 (Fourier transform profilometry, FTP)<sup>[7-9]</sup>等条纹分析方法的动态物体3维面形测量<sup>[10-12]</sup>中具有较高的实用价值。

作者简介: 曹森鹏 (1978-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事光学3维测量和光电信息处理的研究。

E-mail: spcaol68@163.com

收稿日期: 2013-01-18; 收到修改稿日期: 2013-02-02

### 1 理论分析

在采用结构光照明进行 3 维面形测量时, 针对隔行扫描 CCD 获取动态物体的满帧变形条纹图像具有单一调制方向的特点, 在理想情况下, 帧图像拆成奇场和偶场条纹图像, 每场图像在平行 CCD 扫描方向上的相邻两行中, 一行不含物体信息 (灰度值全为 0), 另一行含有物体信息 (CCD 能准确采集); 这样单场图像的强度分布就可看作一个周期性分布的光栅投影得到的满帧条纹图像被一个周期为 2 个像素的方波信号空间抽样所得<sup>[2]</sup>, 它表示为:

$$u(x, y) = u_1(x, y) \cdot u_2(x, y) \quad (1)$$

式中,  $u_1(x, y)$  是由周期性分布的光栅投影得到的满帧条纹图像, 这里以周期性分布的光栅其中的一种——正弦光栅为例说明, 在光栅栅线与 CCD 扫描线垂直时, 它常表示为:

$$u_1(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \times \cos[2\pi f_1 x + \phi(x, y)] \quad (2)$$

式中,  $a(x, y)$  表示背景光强分布,  $b(x, y)$  表示光栅调制度,  $f_1$  代表该光栅空间基频,  $\phi(x, y)$  表示因物体表面高度变化引起的相位调制, 含有物体的高度信息;  $u_2(x, y)$  是周期  $l$  为  $2\pi \text{pixel}$  的方波调制函数, 表示为:

$$u_2(x, y) = \frac{1}{l} \text{comb}\left(\frac{y}{l}\right) * \text{rect}\left(\frac{2y}{l}\right) = f_2 \text{comb}(f_2 y) * \text{rect}(2f_2 y) \quad (3)$$

式中, 星号 \* 表示卷积,  $f_2 (f_2 = 1/l)$  为该方波调制函数的空间基频。

对  $u(x, y)$  进行 2 维快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT), 将  $u_1(x, y), a(x, y), \frac{1}{2}b(x, y) \times \exp[i(2\pi f_1 x + \phi(x, y))], \frac{1}{2}b(x, y) \exp[-i(2\pi f_1 x + \phi(x, y))], u_2(x, y)$  和  $u(x, y)$  的傅里叶变换频谱分别记为  $U_1(f_x, f_y), A(f_x, f_y), W_{+1}(f_x - f_1, f_y), W_{-1}(f_x + f_1, f_y), U_2(f_x, f_y)$  和  $U(f_x, f_y)$ , 则有:

$$U_1(f_x, f_y) = A(f_x, f_y) + W_{+1}(f_x - f_1, f_y) + W_{-1}(f_x + f_1, f_y) \quad (4)$$

$W_{+1}(f_x - f_1, f_y), W_{-1}(f_x + f_1, f_y)$  对应  $U_1(f_x, f_y)$  的  $\pm 1$  级频谱, 含有物体高度信息, 常用来重建物体面形。

$$U_2(f_x, f_y) = \text{FFT}\{u_2(x, y)\} = \frac{1}{2}\delta(f_x, f_y - 0f_2) +$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)\pi} [\delta(f_x, f_y - (2k+1)f_2) + \delta(f_x, f_y + (2k+1)f_2)] \quad (5)$$

$$U(f_x, f_y) = \text{FFT}\{u(x, y)\} =$$

$$U_1(f_x, f_y) * U_2(f_x, f_y) = \frac{1}{2}U_1(f_x, f_y) +$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)\pi} [U_1(f_x, f_y - (2k+1)f_2) + U_1(f_x, f_y + (2k+1)f_2)] \quad (6)$$

从 (4) 式、(5) 式和 (6) 式可知,  $U(f_x, f_y)$  是  $U_1(f_x, f_y)$  与不同位置不同幅值的  $\delta$  函数卷积的结果; 把  $U_1(f_x, f_y)$  复制到该脉冲所在的频谱空间位置, 并乘以该脉冲幅值。(6) 式中的第 1 项与 (4) 式仅仅是幅值不同, 前者为后者的 1/2。在满足抽样定理时,  $U_1(f_x, f_y)$  和  $U_2(f_x, f_y)$  各个频谱间相互分离, 据频谱频率与图像大小的关系<sup>[2]</sup>, 周期为  $2\pi \text{pixel}$  的方波信号图像的频谱面上仅有零频和  $\pm 1$  级频谱, 且  $\pm 1$  级频谱中心分别在频谱面内第 1 行和最后一行之后的第 1 行上, 零级频谱在中间行上。  $U_2(f_x, f_y)$  与  $U_1(f_x, f_y)$  卷积后, 各个频谱之间也是相互分离的;  $U_2(f_x, f_y)$  的  $\pm 1$  级频谱  $\delta(f_x, f_y + f_2), \delta(f_x, f_y - f_2)$  与  $U_1(f_x, f_y)$  卷积的所有频谱中心分别在频谱面内第 1 行和最后一行之后的第 1 行上, 各个频谱部分呈现, 幅值为  $U_1(f_x, f_y)$  的  $1/\pi$ ;  $U_2(f_x, f_y)$  的零级频谱与  $U_1(f_x, f_y)$  卷积的所有频谱中心都在频谱面中间行上, 各个频谱能完整呈现, 幅值为  $U_1(f_x, f_y)$  的 1/2; 要重建满帧的变形条纹, 只需要滤出 (6) 式的第 1 项, 即把频谱中心分布在频谱面中间行上的所有频谱完整滤出, 滤出范围可以在行方向上从频谱面 1/4 总行数到 3/4 总行数, 列方向上没有限制; 再对滤出的这些频谱乘 2, 就能恢复  $U_1(f_x, f_y)$  的频谱  $U'(f_x, f_y)$ 。即:

$$U'(f_x, f_y) = \frac{1}{2}U_1(f_x, f_y) \times 2 = U_1(f_x, f_y) \quad (7)$$

再逆傅里叶变换到空域得  $u'(x, y)$ :

$$u'(x, y) = u_1(x, y) \quad (8)$$

从理论上讲, 去隔行恢复的满帧条纹就是一幅完善的满帧条纹图像。

当正弦光栅栅线与 CCD 扫描线平行时, 只要不存在频谱混叠<sup>[2]</sup>, 也可得出同样的结论, 对一系列的动态存在错位模糊的满帧图像, 先分成两个单场图像, 分别对其进行傅里叶变换去隔行处理, 得到相隔一个场周期时间的两幅完善满帧条纹图像。只是所有频谱中心都在频谱面中间列上, 滤波时特别注

意区分出需要滤出的频谱。

只要完善的满帧条纹图像适合的动态物体测量方法(如 SPD, FTP, PMP 等),模糊的动态条纹图像经过傅里叶变换去隔行处理,也同样可以按照选用的条纹分析方法进行动态面形重建,并且使时间分辨率提高 1 倍。

## 2 仿真试验

利用隔行扫描 CCD 进行动态物体面形测量的模拟试验:在 MATLAB7.1 中选用 peaks 函数(动态范围为  $-6.55\text{mm} \sim 8.11\text{mm}$ )作为参照物体,如图 1 所示;场周期时间间隔设为  $T$ ,高度  $Z$  满足函数  $Z = (3t/T + 1) \times \text{peaks}(t \text{ 为时间})$ ;成像系统与投影系统水平间距  $D = 200\text{mm}$ ,成像系统与参考面间距  $L = 2000\text{mm}$ ,成像大小为  $256\text{pixel} \times 256\text{pixel}$ ,空间基频  $f_1 = 1/(8\text{pixel})$ ,选正弦光栅栅线与 CCD 扫描线垂直情况,向物体表面投影正弦条纹。在  $t = 0$  时刻,隔行扫描 CCD 对上述高度随时间  $t$  变化的物体进行拍摄,因为物体在运动变化,在隔行扫描 CCD 曝光记录一帧图像的帧周期(场周期的 2 倍)时间内,物体已发生了变化,所得变形条纹图实际上是两个场周期时刻的叠加,条纹图像如图 2 所示,可以看到比较明显错位模糊。

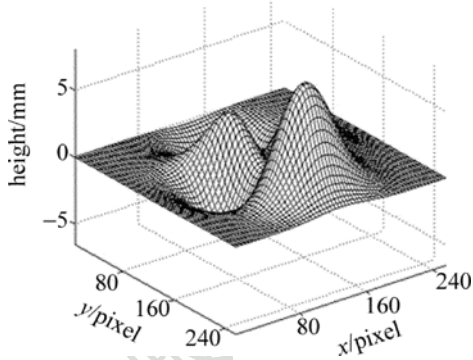


Fig. 1 The simulated object

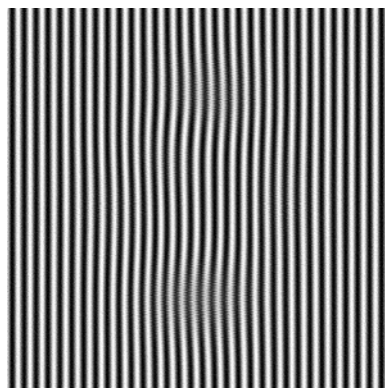


Fig. 2 The dynamic full frame fringe

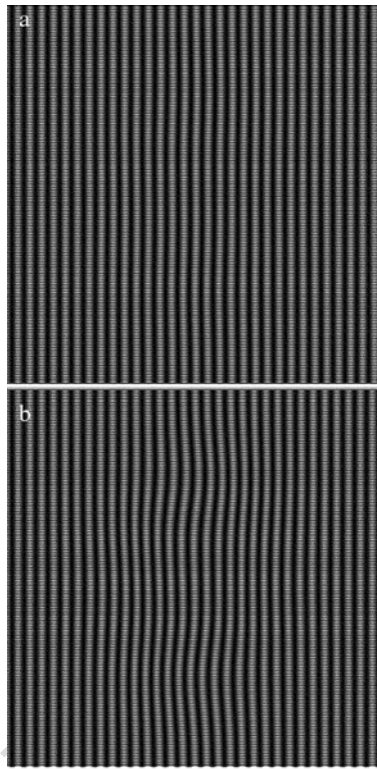


Fig. 3 a—the odd field fringe b—the even field fringe

将这个满帧图像分成两个单场见图 3(图 3a 和图 3b 分别对应帧条纹的奇场条纹、偶场条纹,下同),奇场如图 3a 所示,是在 0 时刻所得;偶场如图 3b 所示,是经过一个场周期  $T$ (即  $t = T$ )后,在第  $T$  时刻隔行扫描 CCD 曝光所得。

分别对图 3a 和图 3b 进行前面所述的傅里叶变换去隔行处理:傅里叶变换,滤出对应(8)式的第 1 项的频谱,乘以 2,逆傅里叶变换,取模使灰度值都为实数。奇数场和偶数场获得的去隔行图像分别对应图 4a 和图 4b。

为了验证算法的正确性,分别模拟了  $t = 0$  时刻和  $T$  时刻对应高度分布不同的 peaks 函数静止状态下的满帧条纹,如图 5(图 5a 和图 5b 分别表示 0,  $T$  时刻的满帧条纹)所示。分别将奇、偶场去隔行条纹图像与 0 时刻和  $T$  时刻静态满帧条纹比较,得到 0 时刻和  $T$  时刻去隔行帧图像的误差,如图 6 所示。计算所得的标准差分别为 0.049 和 0.194;最大误差分别为 2.6 和 10.4;图像周围去除 15 个像素后最大误差分别为 0.08 和 0.32。

可见,去隔行恢复帧图像与相应的准确帧图像间的整体差别非常小,去隔行算法的精度高;误差多分布在栅线( $y$  轴)方向上两端,越往两端,误差越大,中间大部分区域的灰度误差都远小于 1;误差主

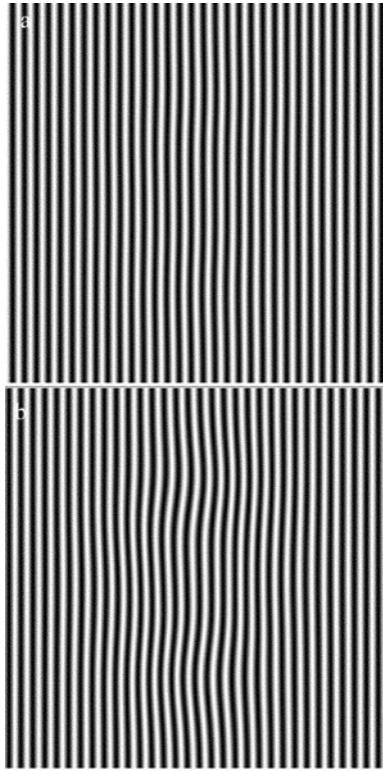


Fig. 4 a—the de-interlacing fringe from odd field b—the de-interlacing fringe from even field

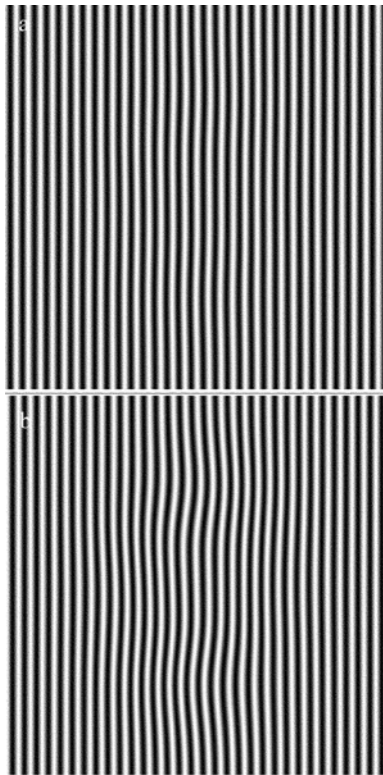


Fig. 5 The static full frame fringe in 0 time and  $T$  time

要来源于频域滤波,沿栅线方向两端误差大是由于在这个方向上还有其它频谱存在,该方向上滤波窗口的选择上不易到达最佳。可以认为,单场图像傅

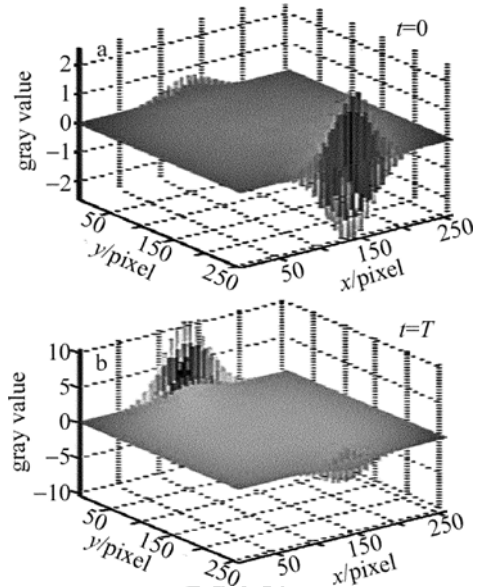


Fig. 6 The error of the de-interlacing frame fringe in 0 time and  $T$  time  
里叶变换去隔行获得的满帧去隔行条纹与准确的满帧条纹相同,与理论分析吻合。说明傅里叶变换去隔行算法对利用隔行扫描 CCD 获取的动态物体图像进行去隔行后,再进行 SPD, FTP, PMP 等相关条纹分析方法进行 3 维面形重建是可行的。

### 3 动态实验

选用一近似圆木块做成单摆,摆长  $L_2 = 1980\text{mm}$ , 拉开物体升起的高度为  $h = 50\text{mm}$ , 用正弦光栅结构光进行照明,接 8mm 标准镜头的 PULNiX TM-6AS 隔行扫描 CCD 相机拍摄单摆运动情况,在光栅栅线与 CCD 扫描线垂直情况下,参考条纹如图 7 所示,从拍摄动态满帧图像中取出 1 帧,截成大小为  $360\text{pixel} \times 260\text{pixel}$ ,如图 8 所示。对图 8 中的

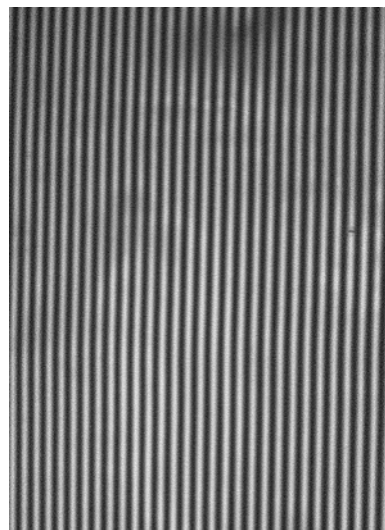


Fig. 7 The reference fringe

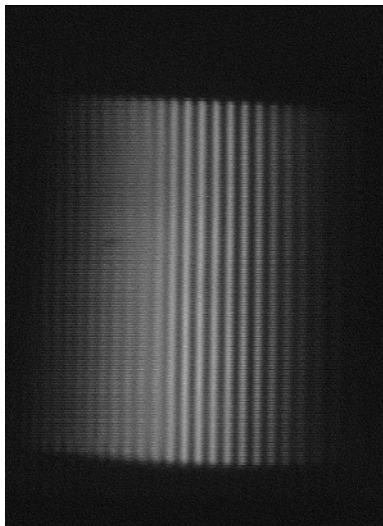


Fig. 8 The dynamic full frame fringe from Fig. 7

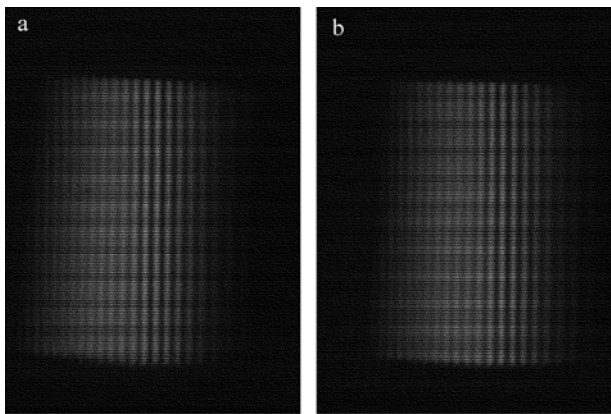


Fig. 9 The odd or even single field fringe of Fig. 8

满帧条纹分成两场,如图9(图9a、图9b图分别表示奇偶场,下同)所示。利用傅里叶变换去隔行算法分别对图9中奇偶场图像进行去隔行处理,结果如图10所示。

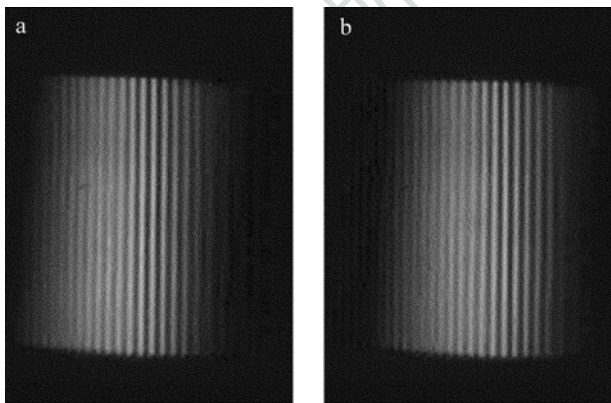


Fig. 10 The de-interlacing fringe from odd or even field of Fig. 9

利用 FTP 重建物体动态面形对应两个时刻(相隔一个场周期)的近似圆木面形,分别对参考条纹、奇偶场去隔行条纹进行傅里叶变换、频域滤波、逆傅里叶变换、相位展开等处理,取第 200 行的奇偶场去

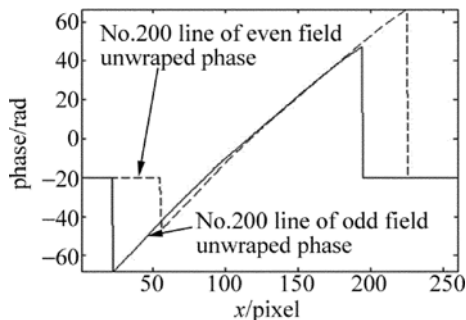


Fig. 11 The unwrapped phase difference de-interlacing fringe from odd and even fields

隔行条纹展开相位比较,如图 11 所示,可清楚地看出奇场与偶场去隔行展开相位前后错开的像素数都不小于 30 个像素。这表明在一个场周期时间内,每帧动态条纹图像的奇偶两场条纹间的差别很大;说明动态满帧条纹奇偶两场采集到的物体部位差别很大,充分表明不能利用满帧动态条纹直接重建物体面形和去隔行处理的必要性。

奇偶场去隔行条纹的相位展开与参考平面相位作差,得到对应两个时刻的动态近似圆木块相位分布,如图 12 所示,可以看到,奇偶场(分别对应图 12a 和图 12b)去隔行条纹的傅里叶变换轮廓术能够很好地重建处于摆动状态下近似圆木的 3 维面形。

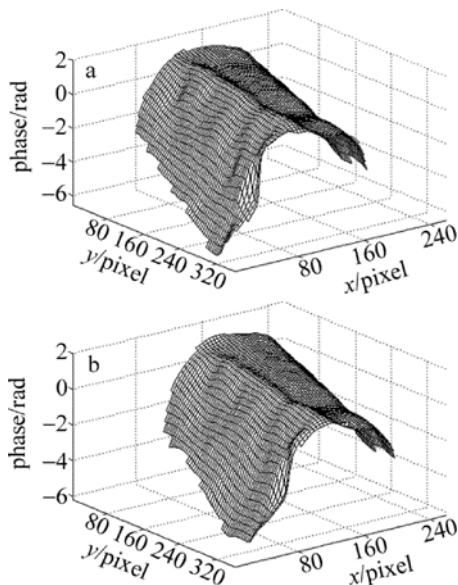


Fig. 12 The restored object from the single field de-interlacing fringe

#### 4 结 论

在动态物体 3 维面形测量中,针对为提高数据采集速率而采用隔行扫描 CCD 获取的动态缺陷条纹,提出并验证了傅里叶变换去隔行算法,把动态的缺陷帧条纹处理成两个相隔一个场周期时间的满帧恢复条纹,再根据使用的条纹分析方法(FTP, PMP

或 SPD) 分别重建两个不同时刻的动态面形。

理论推导、计算机仿真和实际动态实验都表明了该方法的有效性和可行性;利用速率快的傅里叶变换去隔行算法处理隔行扫描 CCD 获取的动态缺陷条纹,用时少,既能够获得高质量的去隔行条纹,又能提高时间分辨率;在隔行扫描 CCD 获取变形条纹动态 3 维面形测量中,具有某些参考价值。

#### 参 考 文 献

- [1] YU Q F, LU H W, LIU X L. Precision measure and movement measure based on image[M]. Beijing: Science Press, 2002: 16-26 (in Chinese).
- [2] CAO S P, ZHANG Q C, WANG Q F, *et al.* Dynamic 3-D shape measurement using the two fields' images of an interleaved camera [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2009, 20(2): 225-229 (in Chinese).
- [3] HANN G D, BELLERS E B. Deinterlacing-an overview[J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(9): 1839-1857.
- [4] TAKEDE M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3-D object shapes [J]. Applied Optics, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [5] SRINIVASAN V, LIU H C, HALIOUA M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D object shape [J]. Applied Optics, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [6] SU X Y, ZHOU W S, VON B G, *et al.* Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of Rochi grating [J]. Optical Communication, 1992, 94(6): 561-573.
- [7] TOYOOKA S, TOMINAGA M. Spatial fringe scanning for optical phase measurement [J]. Optics Communications, 1984, 51(2): 68-70.
- [8] SU X Y, CHEN W J, ZHANG Q Ch, *et al.* Dynamic 3-D shape measurement method based on FTP [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 36(1): 49-64.
- [9] ZHANG Q Ch, SU X Y. High-speed optical measurement for the drumhead vibration [J]. Optics Express, 2005, 13(8): 3110-3116.
- [10] ZHANG Q Ch, SU X Y. An optical measurement of vortex shape at a free surface [J]. Optics and Laser Technology, 2002, 34(2): 107-113.
- [11] ZHANG Q Ch, SU X Y, CAO Y P, *et al.* Optical 3-D shape and deformation measurement of rotating blades using stroboscopic structured illumination [J]. Optical Engineering, 2005, 44(11): 113601-113607.
- [12] REN S Q, FANG Q. Two-channel phase measuring profilometry used in dynamic measurement [J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(4): 452-455 (in Chinese).