

中图法分类号: O438 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)06-0939-08

论文索引信息: 李海, 曾应新, 杨玲玲. 2维载频条纹2维窗口傅里叶变换轮廓术[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(6): 939-946

2维载频条纹2维窗口傅里叶变换轮廓术

李海¹⁾, 曾应新¹⁾, 杨玲玲²⁾

¹⁾(华南农业大学理学院, 广州 510642) ²⁾(韩山师范学院化学系, 潮州 521041)

摘要: 为了解决3维形貌测量中单一频率光栅条纹的测量信息少、1维双频光栅两个同方向载频容易产生频率混叠及两个载频条纹测量精度不同、连续相位解包法在复杂物体相位解包所存在的问题, 提出采用2维网格光栅作为空间载频光栅条纹联合2维窗口傅里叶变换的傅里叶变换轮廓术。两个载频相互垂直, 减少可能的频谱混叠; 应用2维窗口傅里叶变换进行频谱分析和设计带宽自动调整的滤波器分离出两个1维变形光栅条纹, 在一幅变形网格光栅图像中得到两个方向光栅各自所对应的包裹相位分布; 并且应用查表法解包得到真实调制相位分布。与1维单频和1维双频比较, 这种技术可以获得两倍相同精度的测量信息, 并能对复杂物体的相位分布进行解包。给出了详细的理论推导、计算机模拟和实验结果, 证实了该方法的可行性。

关键词: 信息光学; 轮廓术; 2维窗口傅里叶变换; 2维网格光栅

2D Gabor transform profilometry by use of grid grating pattern and variable bandpass filters

Li Hai¹⁾, Zeng Yingxin¹⁾, Yang Lingling²⁾

¹⁾(College of Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642 China)

²⁾(Department of Chemistry, Hanshan Normal University, Chaozhou 521041 China)

Abstract: In order to increase measurement precision in Profilometry, reduce possible frequency overlaps and tolerate the height discontinuity of complex three-dimensional shape, an improved Profilometry using a grid carrier fringe pattern is presented. In the Profilometry, two spatial fringe patterns are perpendicular to each other to avoid frequency overlaps; two one-dimensional deformed grating patterns are separated from the deformed grid pattern by use of both two-dimensional Gabor transform and variable rectangle bandpass filters, from which the wrapped phases in x and y directions are respectively extracted. The corresponding unwrapped phases are achieved by use of a lookup table method. Compared with Profilometry using single frequency fringe pattern and one-dimensional double-frequency fringe pattern, the improved Profilometry could obtain double phase information of identical precision, increase measurement precision and realize discontinuous phase unwrapping. Detailed theoretical analysis is presented, and the simulated and experimental results show that it is feasible.

Keywords: information optics; profilometry; two dimensional Gabor transform; two dimensional grid grating pattern

0 引言

在基于载频条纹的3维形貌测量技术中, 测量

物体的相位展开和测量精度一直受到关注。傅里叶变换轮廓术(FTP)^[1]对陡峭面形容易产生频谱混叠; 相位测量轮廓术(PMP)^[2-3]精度较好, 但需要多幅变形光栅图像, 不适合动态测量; 窗口傅里叶变

收稿日期: 2009-12-28; 修回日期: 2010-05-24

基金项目: 广东省自然科学基金项目(9151064201000035)。

第一作者简介: 李海(1973—), 男, 副教授。2003年获华南理工大学硕士学位, 主要从事光学条纹信号处理以及3维形貌测量研究工作。E-mail: lee.361@163.com。

换^[4-5]和小波变换轮廓术(WTP)^[6-7]能局部提取调制信息从而改善测量精度;但这些方法不可避免地存在包裹相位现象,即相位解调技术直接得到的是 $-\pi$ 到 $+\pi$ 之间的相位;目前采用的解包技术,如直线扫描法、“枝叶型”算法、最小二乘法^[8]都只适用于相位连续分布情况;这些方法都采用1维单一频率光栅条纹进行传感测量,一幅变形光栅图像只能获得测量物体的一组测量数据,测量精度受到限制。对于包含相位突变,如台阶、陡峭等复杂物体表面,1维双频光栅法^[9-10]是一种比较有效的相位展开方法,但两个载频处于同一方向,容易产生频谱混叠,而且频率无法相同导致两个载频的测量精度不同。文献[11]提出采用网格条纹的PMP,两个条纹相互垂直,频谱容易分离,能提供更多的测量信息,但为了分离两个方向1维条纹的包裹相位,设计了一个固定带通滤波器,它无法根据条纹的实际调制情况调整滤波器的带宽。

考虑到变形网格条纹的各个局部调制并不一样和动态测量要求,提出2维网格光栅联合2维窗口傅里叶变换^[12]和可调带宽滤波器的FTP轮廓术,采用2维窗口傅里叶变换对网格条纹进行局部频谱分析,根据局部的频谱分布情况,设计带宽自动调整的滤波器分别提取两个方向条纹的频谱信息;获得两个方向的包裹相位,然后结合查表法进行相位解包;可以获得两倍相同精度的调制相位信息;只需要采集一幅变形网格光栅图像,可以应用于复杂物体动态3维测量。

1 测量原理

实验采用几何光学系统如图1所示,参考平面 $x'O'y'$,平面 xOy 与 $x'O'y'$ 的距离 $L=2800$ mm;摄像机的入瞳中心位于坐标系 xOy 的原点 O ,光轴为 z 轴;DLP投影仪的出瞳中心位于平面 xOy 第2象限内的 A 点,光轴与摄像机的光轴平行, A 点距离 y 轴为 $\overline{AP}=d_x=250$ mm,距离 x 轴为 $\overline{AQ}=d_y=130$ mm;为了清楚说明两个方向条纹的测量过程, a 、 b 是待测物体表面上的两点(对于测量点 a ,光栅条纹直接投影到参考平面是点 C ,测量点 a 经过摄影机 O 点在参考平面上的投影点是 D' , CD 等于条纹移动量, $\triangle aAP$ 与 $\triangle aCD$ 是相似的;类似地,对于测量点 b ,条纹移动量等于 EF),它们的高度分别用 x 、 y 方向光栅测量,分别用 h_x 、 h_y 表示。

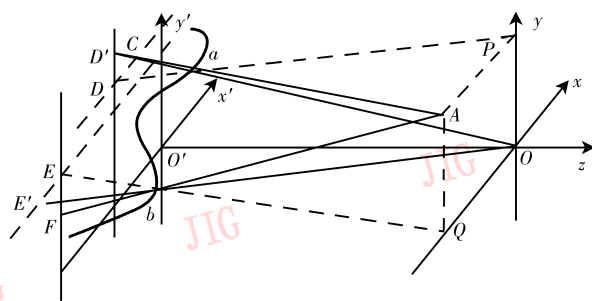


图1 测量光路

Fig.1 Schematic diagram of optical path

2维网格正弦光栅条纹由投影仪投影在待测物体表面。在参考平面上,2维网格光栅可以表示为^[11]

$$g_{2r}(x, y) = r_r(x, y) \sum_{-\infty}^{\infty} A_{mn} (\exp\{j[2\pi n f_{0x} x + n \phi_{0x}(x, y)]\} \cdot \exp\{j[2\pi m f_{0y} y + m \phi_{0y}(x, y)]\}) \quad (1)$$

经过物体调制后,2维变形网格光栅可以表示为

$$g_{2d}(x, y) = r_d(x, y) \sum_{-\infty}^{\infty} A_{mn} (\exp\{j[2\pi n f_{0x} x + n \phi_x(x, y)]\} \cdot \exp\{j[2\pi m f_{0y} y + m \phi_y(x, y)]\}) \quad (2)$$

$r_r(x, y)$ 、 $r_d(x, y)$ 分别表示参考平面和测量物体表面的反射率; A_{mn} 是傅里叶级数的系数; f_{0x} 、 f_{0y} 分别是 x 、 y 方向的基准频率; $\phi_x(x, y)$ 、 $\phi_y(x, y)$ 分别是 x 、 y 方向条纹与物体高度有关的调制相位; $\phi_{0x}(x, y)$ 、 $\phi_{0y}(x, y)$ 分别是 x 、 y 方向条纹与参考平面有关的调制相位。

2 2维窗口傅里叶变换提取两个1维光栅条纹

2.1 2维窗口傅里叶变换和带宽可调滤波器

为了从2维网格光栅条纹中提取物体的两个调制相位,必须把变形光栅条纹中两个1维变形光栅条纹准确地提取出来。考虑到2维变形网格光栅受到物体3维面形的调制,不同区域对2维网格光栅具有不同的调制效果,因此不同区域的变形网格条纹的频谱分布是不同的。为了分析不同区域网格光栅的频谱分布情况,采用一个中心点可移动的2维高斯窗口函数,对2维网格光栅条纹逐个局部地进行2维傅里叶分析;为了滤取 x 、 y 方向的1维条纹

频谱,根据各个局部2维傅里叶频谱特点,设计出能自动调整带宽的滤波器:在各个局部的2维频谱坐标系中, x 方向带通滤波器的带宽等于 y 频率轴上中心对称频谱分布曲线左右两侧第一个最小点间的距离(零级分量的带宽) $\Delta x, \Delta y$ 的大小由计算机自动检测并随每个高斯窗口中频谱分布特点而改变;同理以带宽 Δx 滤取 y 方向光栅频谱;把整幅图像中各个局部的 x, y 方向光栅频谱分别叠加起来,然后分别进行1维逆傅里叶变换,获得 x, y 方向变形光栅,再进行后续的两个包裹相位的提取工作。2维窗口傅里叶变换定义如下

$$G(\xi, \eta, \mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) g(x - \mu, y - \nu) \cdot \exp(-j\xi x) \exp(-j\eta y) dx dy \quad (3)$$

$$g(x, y) = \left(\frac{1}{a\sqrt{2\pi}} \right)^2 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2a^2} \right) \quad (4)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x - \mu, y - \nu) dx dy = 1 \quad (5)$$

式(4)是高斯窗口函数,其中 a 是尺度因子,确定窗口的大小和形状; μ, ν 是窗口中心平移因子,随着 μ, ν 的变化窗口的位置发生相应变化。 $f(x, y)$ 的2维傅里叶变换为

$$F(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp(-j\xi x) \exp(-j\eta y) dx dy \quad (6)$$

$G(\xi, \eta, \mu, \nu)$ 与 $F(\xi, \eta)$ 的关系为

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\xi, \eta, \mu, \nu) d\mu d\nu = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{f(x, y) g(x - \mu, y - \nu) \cdot \exp(-j\xi x) \exp(-j\eta y) dx dy\} d\mu d\nu = F(\xi, \eta) \quad (7)$$

可见2维窗口傅里叶变换得到的频谱叠加起来与2维傅里叶变换得到的频谱是一样的,但前者可以随着局部光栅调制的变化更加细致地把两个方向的频谱分离出来。

x, y 方向带通可调滤波器的频率响应函数分别为

$$\begin{cases} H_x(f_x, f_y) = \text{rect}\left(\frac{f_y}{\Delta y}\right) = \begin{cases} 1 & |f_y| \leq \Delta y/2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\ H_y(f_x, f_y) = \text{rect}\left(\frac{f_x}{\Delta x}\right) = \begin{cases} 1 & |f_x| \leq \Delta x/2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

式中, rect 表示矩形函数,带宽 $\Delta x, \Delta y$ 的大小随不同空间点高斯窗口中频谱分布特点而改变。

2.2 纵向光栅

2维网格光栅中的纵向和横向光栅条纹分别受到待测物体的调制形成相应的变形光栅条纹。采用可调带宽滤波器分离后,对纵向光栅(光栅线垂直 x 轴方向),获得的变形光栅图像和基准光栅图像的基频信息分别表示为^[1]

$$g_{dx}(x, y) = r_d(x, y) A_{d1} \exp\{j[2\pi f_{0x} x + \phi_{d1}(x, y)]\} \quad (9)$$

$$g_{rx}(x, y) = A_{r1} \exp\{j[2\pi f_{0x} x + \phi_{r1}(x, y)]\} \quad (10)$$

将式(9)与式(10)共轭式相乘取对数,分离虚部得到与物体高度有关的调制相位^[1]

$$\Delta\phi_x(x, y) = \phi_{d1}(x, y) - \phi_{r1}(x, y) = 2\pi f_{0x} \overline{CD} \quad (11)$$

利用图1中 $\triangle aAP$ 和 $\triangle aCD$ 的相似关系,得到 x 方向光栅调制相位 $\Delta\phi_x(x, y)$ 和物体表面高度 $h_x(x, y)$ (测量点 a 距离平面 $x'O'y'$ 的高度)的变换关系^[1]

$$h_x(x, y) = -\frac{L\Delta\phi_x(x, y)}{2\pi f_{0x} d_x - \Delta\phi_x(x, y)} = -\frac{L \frac{\Delta\phi_x(x, y)}{f_{0x} d_x}}{2\pi - \frac{\Delta\phi_x(x, y)}{f_{0x} d_x}} \quad (12)$$

2.3 横向光栅

对横向光栅,类似纵向光栅的分析过程,利用图1中 $\triangle bAQ$ 和 $\triangle bEF$ 的相似关系,最终获得 y 方向光栅调制相位 $\Delta\phi_y(x, y)$ 和物体表面高度 $h_y(x, y)$ (测量点 b 距离平面 $x'O'y'$ 的高度)的变换关系^[1]

$$h_y(x, y) = -\frac{L\Delta\phi_y(x, y)}{2\pi f_{0y} d_y - \Delta\phi_y(x, y)} = -\frac{L \frac{\Delta\phi_y(x, y)}{f_{0y} d_y}}{2\pi - \frac{\Delta\phi_y(x, y)}{f_{0y} d_y}} \quad (13)$$

比较式(12)和式(13),两个独立的条纹对同一个测量点进行测量,故 $h_x(x, y) = h_y(x, y)$;若 $d_x = d_y, f_{0x} = f_{0y}$,用2维网格光栅可以获得两个精度相同的测量结果,比1维单频光栅的测量数据增加一倍。

2.4 相位解包

由于采用网格光栅对同一物体进行测量,故 $h_x(x, y) = h_y(x, y)$,比较式(12)(13),得到^[9]

$$\frac{\Delta\phi_y(x,y)}{f_{0y}d_y} = \frac{\Delta\phi_x(x,y)}{f_{0x}d_x} \quad (14)$$

由于傅里叶变换轮廓术是使用反正切函数计算相位的,因此分析得到的实际上是包裹相位 $\Delta\phi_x(x,y)$ 、 $\Delta\phi_y(x,y)$ 。要得到物理上的真实相位 $\Delta\phi_x(x,y)$ 、 $\Delta\phi_y(x,y)$, 必须对包裹相位进行解包处理。 $\Delta\phi_x(x,y)$ 、 $\Delta\phi_y(x,y)$ 与包裹相位 $\Delta\phi_x(x,y)$ 、 $\Delta\phi_y(x,y)$ 的关系为

$$\begin{cases} \Delta\phi_x(x,y) = 2\pi n_x + \Delta\phi_x(x,y) \\ \Delta\phi_y(x,y) = 2\pi n_y + \Delta\phi_y(x,y) \end{cases} \quad (15)$$

把式(15)代入式(14),得到

$$\frac{1}{2\pi} \left[\Delta\phi_x(x,y) - \frac{f_{0x}d_x}{f_{0y}d_y} \Delta\phi_y(x,y) \right] = \frac{f_{0x}d_x}{f_{0y}d_y} n_y - n_x \quad (16)$$

$\Delta\phi_x(x,y)$ 和 $\Delta\phi_y(x,y)$ 可以获得,而且 d_x, d_y, f_{0x}, f_{0y} 是已知的实验系统参数,因此式(16)左边是已知量,右边 n_x, n_y 为两个未知整数,方程不能直接求解。但 n_x, n_y 为整数,可以定义^[9]

$$\Omega = \frac{1}{2\pi} \left[\Delta\phi_x(x,y) - \frac{f_{0x}d_x}{f_{0y}d_y} \Delta\phi_y(x,y) \right] \quad (17)$$

$$T(n_x, n_y) = \frac{f_{0x}d_x}{f_{0y}d_y} n_y - n_x \quad (18)$$

对于任意的 n_x, n_y , 根据式(18)可以列出一表格,表格中给出的值为式(17)的可能值,可以通过查表的方法在表格中找出和 Ω 相等的值,其对应的 n_x, n_y 就是式(15)所要求的值。由于 n_x, n_y 可以取任意值,相位值完全可确定,因此在理论上可以测量的范围是无限的。由式(18)可知,表格中的值与 $\frac{f_{0x}d_x}{f_{0y}d_y}$ 有关。

3 计算机模拟对比

为了比较 2 维网格光栅与 1 维双频光栅在相位测量结果上的差异,分别进行如下数值模拟。

3.1 2 维网格光栅模拟

数值模拟检测上述方法的有效性。设 $\frac{f_{0x}d_x}{f_{0y}d_y} = 1$ 。

采用一个相位物体对计算机产生的一个 x, y 方向空间周期各为 8 个像素的 2 维网格正弦电子光栅进行调制,图像尺寸为 256×256 像素,模拟的相位物体表示为

$$\phi(x,y) = 0.05 [(x - 128)^2 + (y - 128)^2]^{1/2} \quad (19)$$

经过相位物体调制后,变形网格光栅表示为

$$I(x,y) = 50 \{ 2 + \cos[2\pi f_{0x}x + \phi(x,y)] + \cos[2\pi f_{0y}y + \phi(x,y)] \} + noise \quad (20)$$

式中, $noise$ 是强度为信号幅值 10% 的归一化噪声。模拟相位物体的相位分布如图 2 所示;加噪的变形网格光栅如图 3 所示;联合采用 2 维窗口傅里叶变换和可调带宽滤波器提取出来的两个方向的条纹如图 4 和图 5 所示;两个方向提取的相位物体分别如图 6 和图 7 所示。从图 2、图 6 和图 7 可以看出,尽管加上噪声,噪声给解包相位造成一定的起伏,但无论是原来相位物体与提取出来的相位物体的比较,还是两个方向的 1 维条纹提取出来的相位物体的比较,一致性仍然很好,说明 2 维窗口傅里叶变换联合可调滤波器具有良好的提取局部调制信息和一定的抗噪能力。

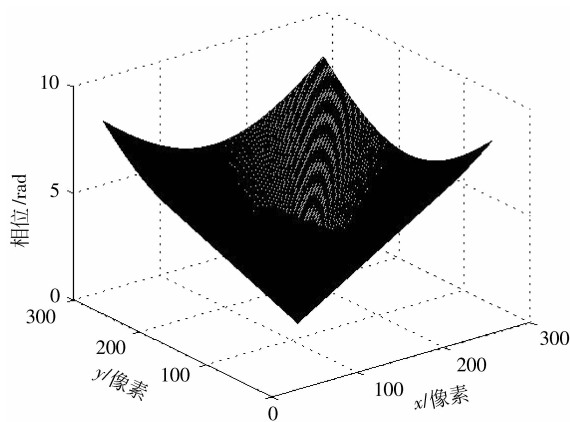


图 2 模拟相位物体

Fig. 2 Simulated phase object

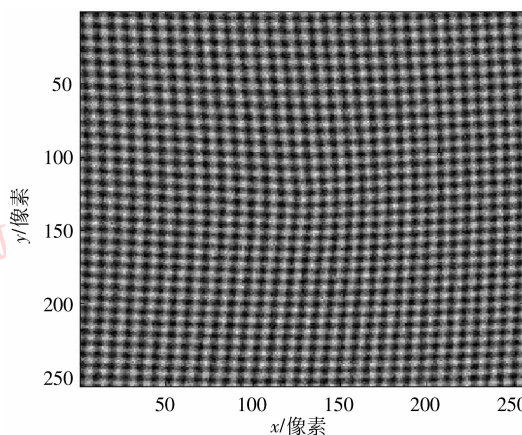


图 3 模拟变形网格光栅加上 10% 噪声

Fig. 3 Simulated deformed grid pattern added 10% noise

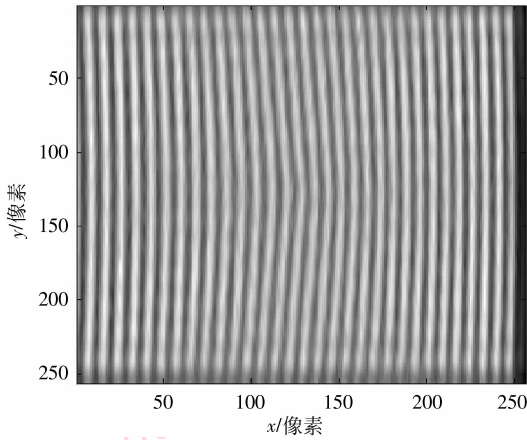


图4 垂直变形条纹
Fig.4 Vertical deformed pattern

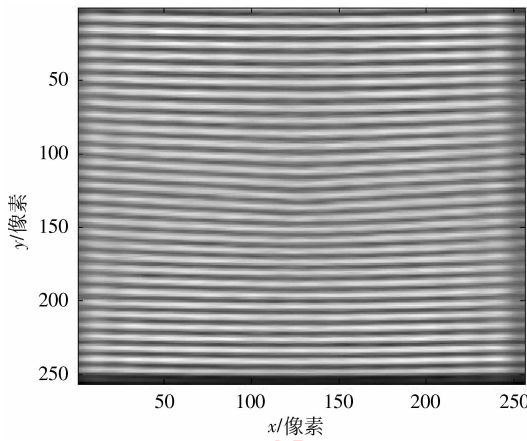


图5 水平变形条纹
Fig.5 Horizontal deformed pattern

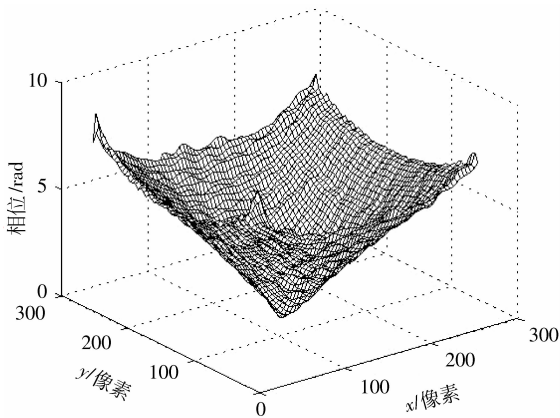


图6 垂直条纹解包相位
Fig.6 Vertical unwrapped phase

3.2 1维双频光栅模拟

为了与采用2维网格条纹的方法进行比较,同样采用式(19)的相位物体对计算机产生的一个y方向

空间频率分别为 $f_{01y} = 1/(8 \text{ 像素})$ 和 $f_{02y} = 1/(8\sqrt{2} \text{ 像素})$ 的1维双频正弦光栅进行调制,图像尺寸为 256×256 像素;调制后,1维双频变形光栅表示为

$$I(x,y) = 50 \{ 2 + \cos[2\pi f_{01y}y + \phi(x,y)] + \cos[2\pi f_{02y}y + \phi(x,y)] \} + noise \quad (21)$$

式中, $noise$ 是强度为信号幅值10%的归一化噪声。加噪的1维双频变形光栅如图8所示;经过滤波分离后从高频条纹和低频条纹中提取的相位物体分别如图9和图10所示。

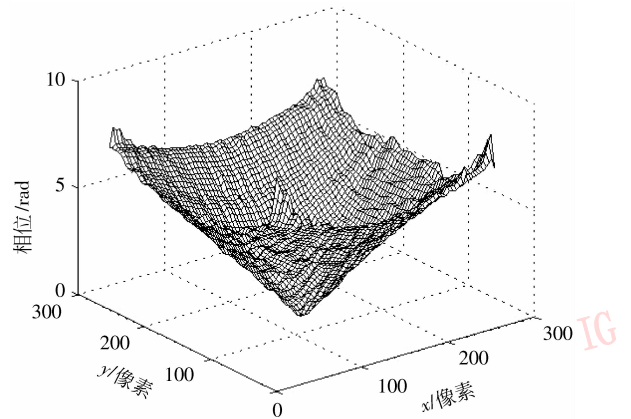


图7 水平条纹解包相位
Fig.7 Horizontal unwrapped phase

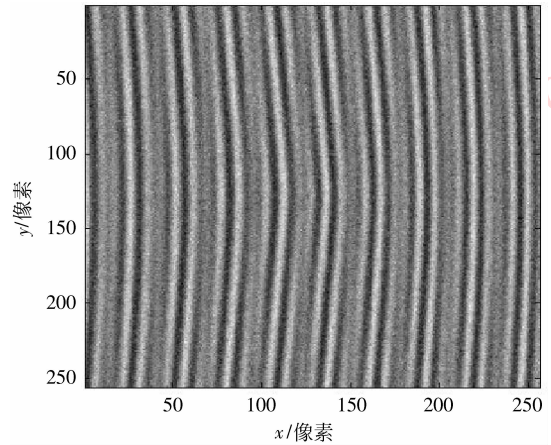


图8 模拟1维双频变形光栅加上10%噪声
Fig.8 Simulated dual-frequency deformed pattern added 10% noise

将2维网格条纹解包相位图6和图7与1维双频条纹的解包相位图9和图10进行比较,可以看出,采用2维网格条纹,由于两个载频的频率可以相同,测量精度几乎一样;而且两个载频在空间上相互独立,可以有效分离,避免了频谱混叠对解包相位的影响。采用1维双频光栅,由于两个载频频率无法

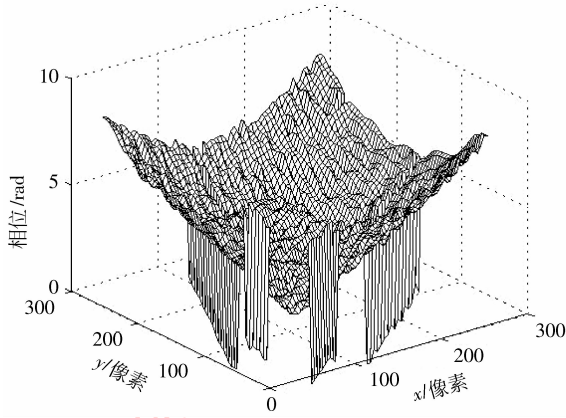


图 9 周期 $T=8$ 像素条纹解包相位
Fig. 9 Unwrapped phase (period 8 pixels)

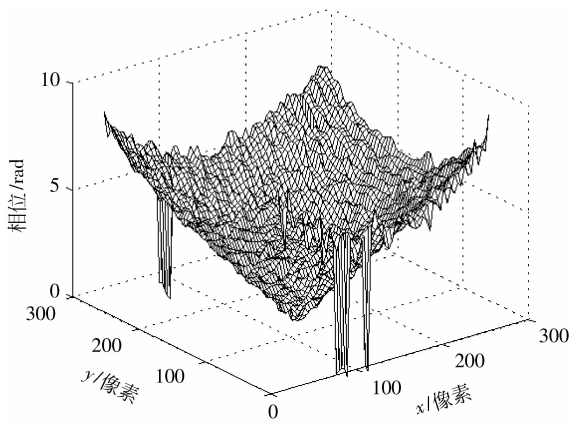


图 10 周期 $T=11.2$ 像素条纹解包相位
Fig. 10 Unwrapped phase (period 11.2 pixels)

相同,两个解包相位精度不同,频率小的整体起伏比较大(图 10),精度较频率大(图 9)的低;而且由于两个不同频率的条纹在同一方向,容易产生频谱混

叠,导致解包相位出现突变点。因此,采用 2 维网格条纹与采用 1 维双频条纹相比可以提高测量精度。

4 实验

用计算机产生一个 x,y 方向空间周期为 4 个像素的 2 维网格正弦电子光栅,通过数字投影仪(DLP)投射到待测物体上。经过物体调制,产生一个 2 维变形网格光栅,尺寸为 480×512 像素,如图 11 所示。某个局部的 2 维窗口傅里叶频谱分布和 x,y 方向带通滤波器自动调整的带宽如图 12 所示,通过对各个窗口内 x,y 方向变形光栅频谱信息的分离、累加,逆 1 维傅里叶变换得到的两个 1 维变形光栅条纹分别如图 13、14 所示。根据式(18)和实验参数制作的表格 $T(n_x, n_y)$ 如表 1 表示。将滤波分离的两个方向的 1 维光栅图像分别提取包裹相位,进而应用查表相位解包法进行解包处理,得

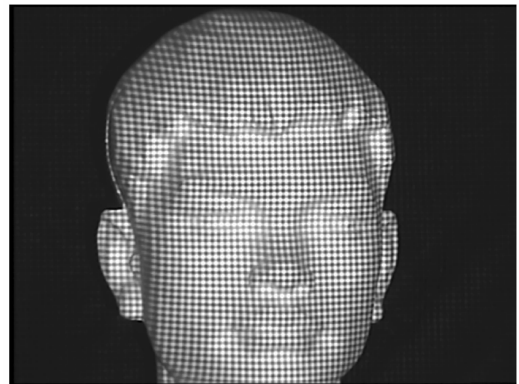


图 11 变形网格光栅
Fig. 11 Deformed grid grating pattern

表 1 $T(n_x, n_y)$ 的值
Tab. 1 Value of $T(n_x, n_y)$

n_x	n_y								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-4	-3.692	-1.769	0.153	2.077	4	5.923	7.847	9.769	11.692
-3	-4.692	-2.769	-0.847	1.077	3	4.923	6.847	8.769	10.692
-2	-5.692	-3.769	-1.847	0.077	2	3.923	5.847	7.769	9.692
-1	-6.692	-4.769	-2.847	-0.923	1	2.923	4.847	6.769	8.692
0	-7.692	-5.769	-3.847	-1.923	0	1.923	3.847	5.769	7.692
1	-8.692	-6.769	-4.847	-2.923	-1	0.923	2.847	4.769	6.692
2	-9.692	-7.769	-5.847	-3.923	-2	-0.077	1.847	3.769	5.692
3	-10.692	-8.769	-6.847	-4.923	-3	-1.077	0.847	2.769	4.692
4	-11.692	-9.769	-7.847	-5.923	-4	-2.077	-0.153	1.769	3.692

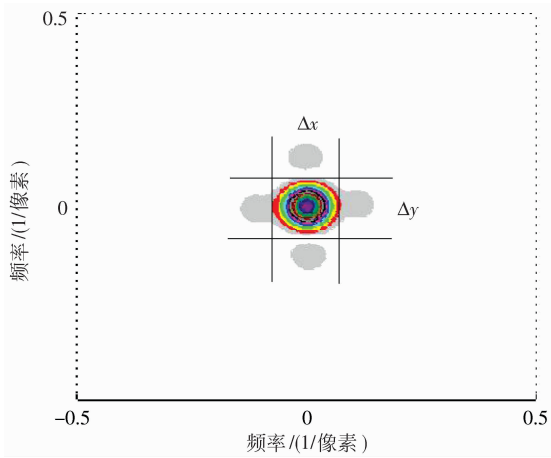


图 12 高斯窗口中变形网格光栅频谱

Fig. 12 Spectrum of deformed grid pattern in a Gaussian window

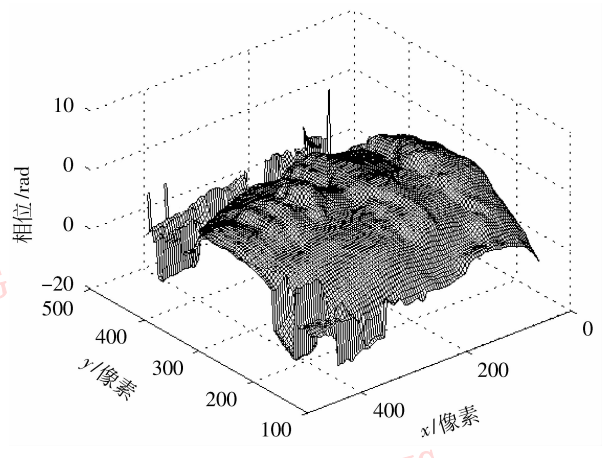


图 15 垂直方向解包相位

Fig. 15 Vertical unwrapped phase

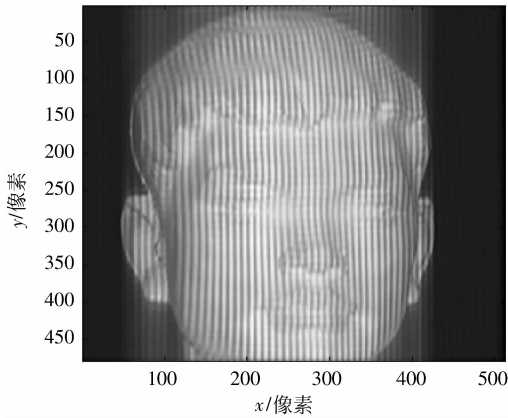


图 13 垂直方向变形光栅

Fig. 13 Vertical deformed grating pattern

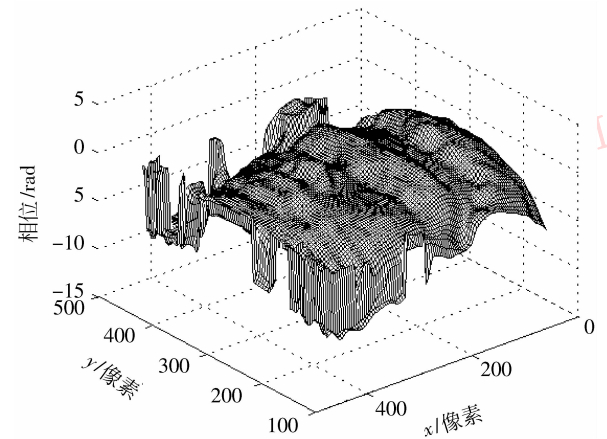


图 16 水平方向解包相位

Fig. 16 Horizontal unwrapped phase

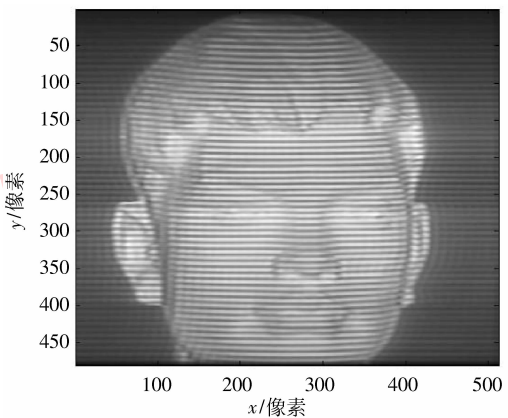


图 14 水平方向变形光栅

Fig. 14 Horizontal deformed grating pattern

到 x, y 方向的解包相位, 分别如图 15、16 所示。2 维窗口傅里叶变换和可调带宽滤波器联用虽然可

以随着局部调制程度的变化比较精确地提取两个方向的 1 维变形条纹和包裹相位, 但这种精细化分析是以时间为代价的。

5 结 论

提出基于 2 维窗口傅里叶变换联合带宽可调滤波器的 2 维载频条纹轮廓术。采用一个 2 维网格光栅条纹进行光学传感, 考虑不同区域的调制情况, 应用 2 维窗口傅里叶变换分析 2 维载频变形网格条纹各个局部区域的频谱分布, 联合带宽能自动伸缩的滤波器分别滤取 x, y 方向的 1 维变形条纹, 可以获得两倍的调制相位信息, 提高测量精度; 并结合查表法进行相位解包, 可以对复杂物体的包裹相位进行解包, 有效地测量陡峭物体的 3 维面形。

参考文献 (References)

- [1] Mitsuo Takeda, Kazuhiro Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. Applied Optics, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [2] Yang Fujun, He Xiaoyuan. Two-step phase-shifting fringe projection profilometry: intensity derivative approach [J]. Applied Optics, 2007, 46(29): 7172-7178.
- [3] Xue Lian, Su Xianyu. Phase-unwrapping algorithm based on frequency analysis for measurement of a complex object by the phase measuring profilometry method [J]. Applied Optics, 2001, 40(8): 1207-1215.
- [4] Qian Kemao. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis[J]. Applied Optics, 2004, 43(13): 2695-2702.
- [5] Qian Kemao, Wang Haixia, Gao Wenjing, Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: theoretical analyses [J], Applied Optics, 2008, 47(29): 5408-5419.
- [6] Chen Fanxiu, He Xiaoyuan, Instantaneous three-dimensional profile measurement based on temporal wavelet transform [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(12): 1803-1806. [陈凡秀, 何小元, 基于时域小波变换相位提取的三维形貌测量 [J]. 光学学报, 2006, 26(12): 1803-1806.]
- [7] Sun Juan, Chen Wenjing, Su Xianyu, et al. Study the measurement range of wavelet transform profilometry [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(4): 647-653. [孙娟, 陈文静, 苏显渝, 等. 小波变换轮廓术的测量范围研究 [J]. 光学学报, 2007, 27(4): 647-653.]
- [8] Ma Min, Zhang Dongsheng, Least-square method for phase unwrapping [J]. Optical Technique, 2002, 28(1): 94-96. [马民, 张东升. 最小二乘法相位解包裹方法 [J]. 光学技术, 2002, 28(1): 94-96.]
- [9] Weng Jiawen, Zhong Jingang. Application of wavelet transform profilometry in bi-frequency grating fringe [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(5): 603-608. [翁嘉文, 钟金钢. 小波变换轮廓术在双频光栅条纹中的应用 [J]. 光学学报, 2005, 25(5): 603-608.]
- [10] Hao Y, Zhao Y, Li D. Multifrequency grating projection profilometry based on nonlinear excess fraction method [J]. Applied Optics, 1999, 38(19): 4106-4110.
- [11] Zheng Ruihua, Wang Yuxiao, Zhang Xueru, et al. Two-dimensional phase-measuring profilometry [J]. Applied Optics, 2005, 44(6): 954-958.
- [12] Weng Jiawen, Yang Chuping, Huang Di. Applied two-dimensional window fourier transform to achieve numerical reconstruction in holography [J]. Optics & optoelectronic technology, 2009, 7(4): 45-48. [翁嘉文, 杨初平, 黄迪. 应用二维窗口傅里叶变换实现全息图数值再现 [J]. 光学与光电技术, 2009, 7(4): 45-48.]