

文章编号: 0253-2239(2010)08-2242-07

采用二维载频条纹的二维伽博小波变换轮廓术

杨初平 翁嘉文 林芳

(华南农业大学物理系, 广东 广州 510642)

摘要 为解决三维形貌测量中非连续相位解包问题并提高测量精度,提出了采用二维网格光栅作为空间载频条纹的二维伽博小波变换轮廓术。与采用一维单一频率载频条纹轮廓术比较,该方法可以获得两倍的测量信息,并且可以达到相同的测量精度。提取二维网格条纹中的两个调制相位时,该方法不必设计带通滤波器来分离两个一维条纹,而是直接应用二维伽博小波变换。通过检测小波脊,从一幅变形网格光栅图像中直接提取两个方向光栅条纹各自所对应的包裹相位分布,结合查表法进行解包从而得到确定的调制相位分布。给出了详细的理论推导,实验结果证实了该方法的可行性。

关键词 测量;二维伽博小波变换轮廓术;二维网格光栅;三维形貌测量

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103008.2242

Two-Dimensional Gabor Wavelet Transform Profilometry Using Two-Dimensional Grid Fringe Pattern

Yang Chuping Weng Jiawen Lin Fang

(Department of Physics, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract In order to overcome the discontinuous phase unwrapping in three-dimensional (3D) shape measurements of discontinuous objects and improve measurement precision, a two-dimensional Gabor wavelet transform profilometry (2D-WTP) using a grid fringe pattern is presented. Compared with the profilometry using one-dimensional single frequency fringe pattern, double measurement informations can be obtained from the method and they can reach the same precision. It is unnecessary to utilize bandpass filters in the method for extracting two modulation phases from the grid fringe pattern. Through detecting the ridge, two wrapped phases along the x - and y - axis directions are directly extracted using 2D Gabor wavelet transform from the deformed grid fringe pattern respectively, and the corresponding unwrapped phases are obtained by use of a lookup table method. The detailed theoretical analysis is given and the experimental results show that the above method is valid.

Key words measurement; two-dimensional Gabor wavelet transform profilometry; two-dimensional grid fringe pattern; three-dimensional shape measurement

1 引言

在三维形貌测量技术中,如何获得真实的相位分布一直受到人们关注。为了得到真实的相位分布,传统解包算法诸如直线扫描法、“枝叶型”算法等,根据相位图中相邻两点相位差超过 π 的,通过加上或减去 2π 消除截断线,就能得到连续相位分布,因而只适用于相位连续分布情况。对于包含相位突变,如台阶、陡峭表面和噪声的相位测量,一维双频光栅法^[1,2]是一种有效方法,但一维双频光栅由于

两个光栅条纹处于同一方向,容易产生频谱混叠,而且两个条纹的载频不相同,测量精度无法相同。无论是傅里叶变换轮廓术(FTP)^[3~5]、相位测量轮廓术(PMP)^[6,7],还是小波变换轮廓术(WTP)^[8~11],都是采用一维单一载频条纹进行传感,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。为了实现相位展开和提高测量精度,文献[12]提出了采用二维网格光栅的PMP,为了获得两个一维光栅的包裹相位,该方法借助一个通

收稿日期: 2009-08-17; 收到修改稿日期: 2009-11-23

基金项目: 广东省自然科学基金(9151064201000035)资助课题。

作者简介: 杨初平(1970—),男,博士,副教授,主要从事光学信息处理方面的研究。E-mail: yangchp@scau.edu.cn

频带宽固定的滤波器分离两个一维光栅。

本文提出基于二维伽博小波变换的二维网格载频光栅的轮廓术,能从一幅变形光栅条纹获得两倍测量数据;为了实现两个垂直方向调制相位提取,无须设计带通滤波器分离两个独立的一维变形光栅条纹,采用二维小波变换^[13~16],通过检测小波变换脊的位置,直接对网格光栅中两个相互垂直方向的载频条纹的包裹相位进行提取,然后结合查表相位解包法实现相位解包。

2 二维载频条纹二维伽博小波变换轮廓术

二维伽博小波变换轮廓术采用的几何光学系统

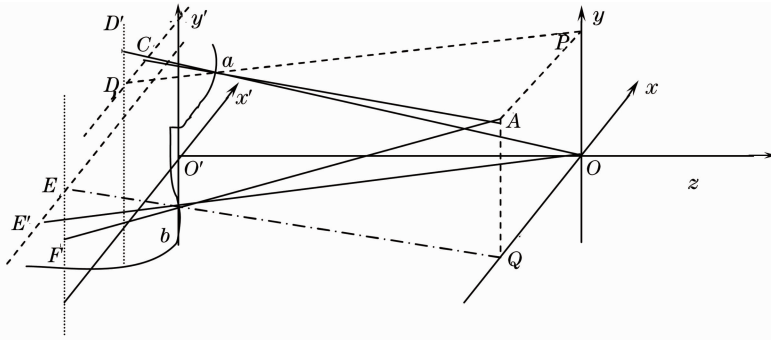


图 1 测量光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical path for measurement

在参考平面上,二维网格正弦光栅条纹可以表示为^[12]

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

物体表面的二维变形网格光栅可以表示为

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

式中 $r_c(x, y)$, $r_d(x, y)$ 分别为参考平面和测量物体表面的非均匀反射率; A_{mm} 为傅里叶级数的系数; f_{0x} , f_{0y} 分别为 x , y 方向的基准频率; $\phi_x(x, y)$, $\phi_y(x, y)$ 分别为 x , y 方向条纹与物体高度有关的调制相位; $\phi_{0x}(x, y)$, $\phi_{0y}(x, y)$ 分别为 x , y 方向条纹在参考平面上的调制相位。

下面分别对二维网格光栅两个方向的一维光栅的测量过程进行分析讨论。

2.1 纵向光栅调制相位

测量物体表面对纵向光栅条纹基频产生的调制相位^[3]

$$\Delta\phi_x(x, y) = \phi_x(x, y) - \phi_{0x}(x, y) = 2\pi f_{0x} \overline{CD}. \quad (3)$$

利用图 1 中三角形 $\triangle aAP$ 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^[3]

$$h_x(x, y) = -\frac{L\Delta\phi_x(x, y)}{2\pi f_{0x} d_x - \Delta\phi_x(x, y)} = -\frac{L\Delta\phi_x(x, y)/f_{0x} d_x}{2\pi - \Delta\phi_x(x, y)/f_{0x} d_x}. \quad (4)$$

2.2 横向光栅调制相位

对横向光栅,类似纵向光栅的分析过程, y 方向基频光栅调制相位为^[3]

如图 1 所示,参考平面为 $x'O'y'$, 平面 xOy 与 $x'O'y'$ 的距离为 $L = 2800$ mm; 摄像机的入瞳中心位于坐标系 xOy 的原点 O , 光轴为 z 轴; 数字光学投影仪的出瞳中心位于平面 xOy 第二象限内的 A 点, 光轴与摄像机的光轴平行, 距离 y 轴为 $\overline{AP} = d_x = 260$ mm, 距离 x 轴为 $\overline{AQ} = d_y = 140$ 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 (经过测量点 a , 光栅条纹直接投影到参考平面的点 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, 三角形 $\triangle aAP$ 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。

$$\Delta\phi_y(x, y) = \phi_y(x, y) - \phi_{0y}(x, y) = 2\pi f_{0y} \overline{EF}. \quad (5)$$

利用图 1 中三角形 $\triangle BAQ$ 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^[3]

$$h_y(x, y) = -\frac{L\Delta\phi_y(x, y)}{2\pi f_{0y}d_y - \Delta\phi_y(x, y)} = -\frac{L\Delta\phi_y(x, y)/(f_{0y}d_y)}{2\pi - \Delta\phi_y(x, y)/(f_{0y}d_y)}. \quad (6)$$

比较(4)式和(6)式, 若对同一个测量点进行测量, 则 $h_x(x, y) = h_y(x, y)$; 若 $f_{0x} = f_{0y}$, $d_x = d_y$, 用二维网格光栅可以获得两个精度相同的测量结果, 可以克服一维双频光栅由于两个光栅频率不同而导致两个测量结果精度无法相同的不足; 比一维单频光栅的测量数据增加一倍。

下面采用二维伽博小波变换直接从变形网格光栅提取两个调制相位, 不必设计滤波器分离两个一维光栅; 可以有效避免两个方向条纹的频谱混叠。

2.3 二维伽博小波变换提取调制相位

为了直接从二维变形光栅条纹中提取两个方向的调制相位, 引进二维伽博小波变换。若 $f(x, y)$ 表示二维变形光栅条纹的强度分布, 定义二维伽博小波变换系数为^[15]

$$W_f(s, \theta, a, b) = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} f(x, y) \psi_{s, \theta}^*(x, y, a, b) dx dy, \quad (7)$$

$$\psi_{s, \theta}(x, y, a, b) = \frac{1}{s} \psi\left(\frac{x-a}{s}, \frac{y-b}{s}, \theta\right), \quad (8)$$

式中 $\psi_{s, \theta}(x, y, a, b)$ 是通过移动、旋转母小波函数 $\psi(x, y)$ 获得的子小波函数, s, θ 分别为尺度参数和旋转参数; a, b 为空间点位置; 角标“*”是共轭符号。母小波函数定义为^[9]

$$\psi(x, y) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{2\pi}{\gamma}} \exp\left[-\frac{(2\pi/\gamma)^2(x^2 + y^2)}{2} + j2\pi(x + y)\right], \quad \gamma = \pi \sqrt{\frac{2}{\ln 2}}. \quad (9)$$

相应的子小波函数为

$$\begin{aligned} \psi_{s, \theta}(x, y, a, b) = & \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{2\pi}{\gamma}} \exp\left[-\frac{(2\pi/\gamma)^2[(x-a)^2 + (y-b)^2]}{2s^2}\right] \times \\ & \exp\left[\frac{j2\pi[(x-a)\cos\theta + (y-b)\sin\theta]}{s}\right]. \end{aligned} \quad (10)$$

二维伽博小波变换提取光栅条纹相位的过程可以描述如下: (7)式的积分是比较局部光栅条纹与不同尺度和旋转角的二维伽博小波的相似性, 对于某对参数 (s, θ) , 如果局部条纹的瞬时频率最接近二维伽博小波的频率, 同时局部条纹的取向最接近二维伽博小波的旋转角, 则二维伽博小波变换系数达到最大值, 称为二维伽博小波变换脊, 这时二维伽博小波与局部条纹最相似, 在二维伽博小波变换脊位置能够确定局部条纹的瞬时频率和相位。

计算二维伽博小波变换, 获得小波变换系数的模量和相位分别为

$$A(s, \theta, a, b) = \sqrt{\{\operatorname{Re}[W_f(s, \theta, a, b)]\}^2 + \{\operatorname{Im}[W_f(s, \theta, a, b)]\}^2}, \quad (11)$$

$$\varphi(s, \theta, a, b) = \arctan \frac{\operatorname{Im}[W_f(s, \theta, a, b)]}{\operatorname{Re}[W_f(s, \theta, a, b)]}, \quad (12)$$

式中 $\operatorname{Re}[W_f(s, \theta, a, b)]$, $\operatorname{Im}[W_f(s, \theta, a, b)]$ 分别为 $W_f(s, \theta, a, b)$ 的实部和虚部。一个实函数的二维伽博小波变换结果是一个与参数 s, θ, a, b 有关的四维数列。图 2 是对一个尺寸为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 的图像进行二维伽博小波变换结果的图示, 设尺度参数为 2, 3, 4, 5, 6, 旋转角参数为 $0, 10^\circ, 20^\circ$ 。

从图 2 中提取空间点 (a, b) 的二维伽博小波变换系数, 获得一个 5×3 数列, 如图 3 所示。沿着尺寸参数和旋转角找出二维伽博小波变换系数模量的最大值, 即峰值 $P(s_i, \theta_i, a, b) = \operatorname{Max}\{A(s, \theta, a, b)\}$, 所对应的相位 $\varphi(s_i, \theta_i, a, b)$ 就是空间点 (a, b) 的调制相位。

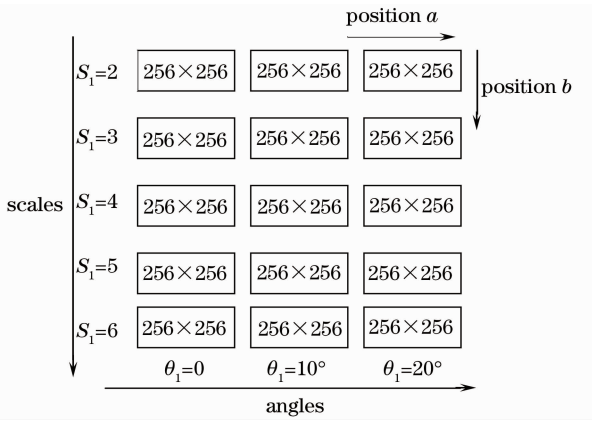


图 2 二维伽博小波变换

Fig. 2 Illustration of 2D Gabor wavelet transform (GWT)

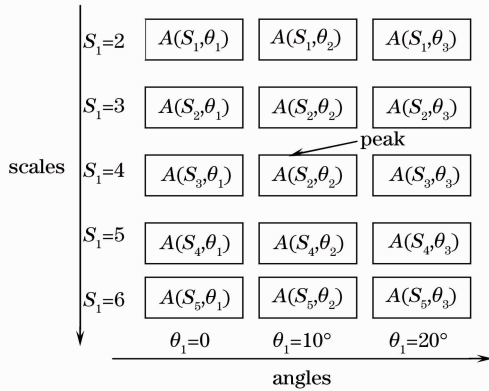


图 3 二维小波变换的峰值

Fig. 3 Illustration of the peak of 2D GWT

对于二维载频变形条纹，改变旋转角和相应的尺度参数，可以在每个像素点的小波变换系数模量中找到两个最大值，它们对应的两个相位值就是 x 、 y 两个方向变形条纹的调制相位。

3 查表法相位解包

二维伽博小波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 $\phi_x(x, y)$ 、 $\phi_y(x, y)$ ，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 $\Delta\varphi_x(x, y)$ 、

$\Delta\varphi_y(x, y)$ 的关系为^[2]

$$\begin{cases} \Delta\phi_x(x, y) = 2\pi n_x + \Delta\varphi_x(x, y) \\ \Delta\phi_y(x, y) = 2\pi n_y + \Delta\varphi_y(x, y) \end{cases} \quad (13)$$

获得真实相位必须获得 n_x, n_y 。可以利用两个方向条纹测量结果之间的联系来计算真实相位。由于是在相同的实验系统中对相同的物体进行测量，比较 (4) 式和 (6) 式，因为 $h_x(x, y) = h_y(x, y)$ ，得到

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

把 (13) 式代入 (14) 式，得到

$$\frac{1}{2\pi} [\Delta\varphi_x(x, y) - \frac{f_{0x}d_x}{f_{0y}d_y} \Delta\varphi_y(x, y)] = \left(\frac{f_{0x}d_x}{f_{0y}d_y} n_y - n_x \right), \quad (15)$$

式中 $\Delta\varphi_x(x, y)$ 和 $\Delta\varphi_y(x, y)$ 可以通过二维伽博小波变换相位解调算法获得，而且 d_x, d_y, f_{0x}, f_{0y} 是已知的实验系统参数，因此 (15) 式左边是已知量；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^[2]

$$\Omega = \frac{1}{2\pi} [\Delta\varphi_x(x, y) - \frac{f_{0x}d_x}{f_{0y}d_y} \Delta\varphi_y(x, y)], \quad (16)$$

$$T(n_x, n_y) = \left(\frac{f_{0x}d_x}{f_{0y}d_y} n_y - n_x \right), \quad (17)$$

对于任意的 n_x, n_y ，可以根据 (17) 式可以作出一表格，表格中给出的值为 (16) 式可能值，通过查表的方法在表格中找出和 Ω 相等的值 $T(n_x, n_y)$ ，其对应的 n_x, n_y 就是 (13) 式所要求的值。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。在实际的相位解包过程中，由于存在一定的误差，两个包裹相位 $\Delta\varphi_x(x, y)$ 、 $\Delta\varphi_y(x, y)$ 代入 (16) 式后与 (17) 式的值不可能严格相等，采用计算机自动检测最小值 $\min |\Omega - T(n_x, n_y)|$ 来确定真实的 n_x, n_y 的值。根据 (17) 式制作的表格 $T(n_x, n_y)$ 如表 1 表示。(17) 式表明表 1 中的值随 $\frac{f_{0x}d_x}{f_{0y}d_y}$ 的不同而改变。

表 1 $T(n_x, n_y)$ 的值

Table 1 Values of $T(n_x, n_y)$

$T(n_x, n_y)$	n_y										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-3	-6.285	-4.428	-2.571	-0.714	1.142	3	4.857	6.714	8.571	10.428	12.285
-2	-7.285	-5.428	-3.571	-1.714	0.142	2	3.857	5.714	7.571	9.428	11.285
-1	-8.285	-6.428	-4.571	-2.714	-0.857	1	2.857	4.714	6.571	8.428	10.285
n_x	0	-9.285	-7.428	-5.571	-3.714	-1.857	0	1.857	3.714	5.571	7.428
	1	-10.285	-8.428	-6.571	-4.714	-2.857	-1	0.857	2.714	4.571	6.428
	2	-11.285	-9.428	-7.571	-5.714	-3.857	-2	-0.142	1.714	3.571	5.428
	3	-12.285	-10.428	-8.571	-6.714	-4.857	-3	-1.142	0.714	2.571	4.428

4 数值模拟

为了检验这种方法的有效性,一个模拟相位物体被用来调制一个计算产生的载频网格条纹,尺寸为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$,调制后从变形网格光栅截取的图像尺寸为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。相位物体相位分布表示为

$$\phi(x, y) = -0.05[(x - 320)^2 + (y - 240)^2]^{1/2}, \quad (18)$$

经过相位物体调制后,变形网格光栅表示为

$$I(x, y) = 50\{2 + \cos[2\pi f_{0x}x + \phi(x, y)] + \cos[2\pi f_{0y}y + \phi(x, y)]\} + N, \quad (19)$$

式中 $f_{0x} = f_{0y} = 0.125 \text{ pixel}$; N 是强度为信号幅值的 10% 的归一化噪声。在模拟计算中,为了突出两个方向的载频条纹的测量结果具有相同的测量精度,并方便相位解包,故取 $f_{0x} = f_{0y}, d_x = d_y$, 因而 $\frac{f_{0x}d_x}{f_{0y}d_y} = 1$, 小波尺度范围为 $2 \sim 8$, 步长为 0.25; 提取垂直条纹的调制信息时旋转角取值为 $(-\frac{\pi}{18}, 0, \frac{\pi}{18})$; 提取水平条纹的调制信息时旋转角取值为 $(\frac{4\pi}{9}, \frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{9})$ 。

原来模拟相位物体的相位分布如图 4 所示; 加噪的变形网格光栅如图 5 所示; 提取出来的两个方向相位物体分别如图 6 和图 7 表示。把模拟相位物体和两个方向提取出来的解包相位分布进行比较, 尽管加上噪声, 噪声给解包相位造成一定的起伏, 但一致性仍然很好, 说明二维伽博小波变换具有很好的抗噪能力。

精度检测如图 8 所示, 为了检测测量精度, 把从垂直和水平方向条纹的展开相位中的第 128 行分别提取出来, 并运算这两行的平均值, 图 8 中显示平均结果处于两条原始数据曲线的中间, 降低了起伏, 改善了测量精度。

在模拟实验中, 如果应用二维傅里叶分析并采用一定带宽的滤波器, 可以分别从变形网格光栅条纹中提取出来两个一维变形光栅条纹, 每个一维变形光栅条纹相当于模拟物体对一维载频条纹的调制结果, 从每个一维条纹中只能获得模拟物体的一倍测量数据, 因而测量精度受到限制。如果采用一维双频载频条纹, 由于两个载频条纹位于同一方向, 载频频率无法相同, 因而两组测量数据精度不同。采用网格载频条纹, 两个方向的一维条纹的载频可以一样; 采用二维伽博小波变换, 可以不用进行二维傅

里叶频谱分析和设计滤波器分离两个一维变形条纹, 直接从变形网格条纹中提取两组调制相位, 这是二维伽博小波变换的优势。

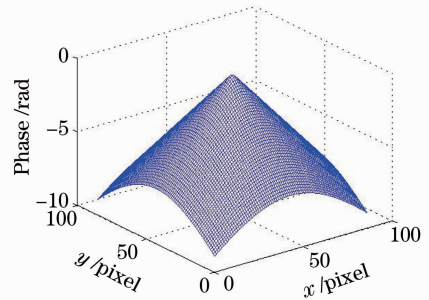


图 4 模拟相位物体

Fig. 4 Simulated phase object

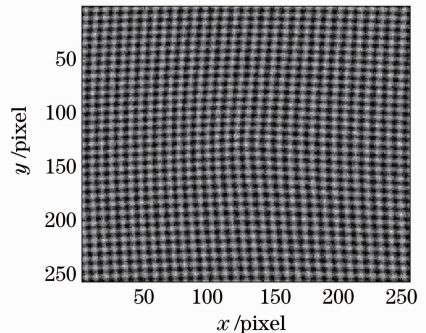


图 5 模拟变形网格光栅

Fig. 5 Simulated deformed grid pattern

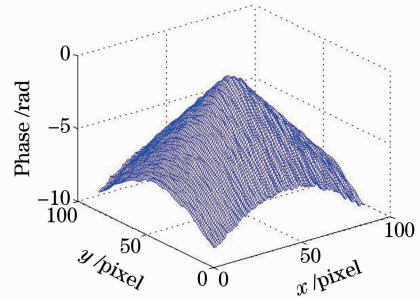


图 6 垂直条纹解包相位

Fig. 6 Unwrapped phase vertical fringe

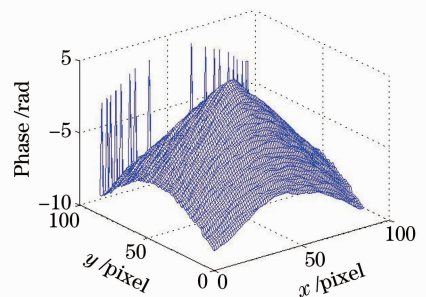


图 7 水平条纹解包相位

Fig. 7 Unwrapped phase horizontal fringe

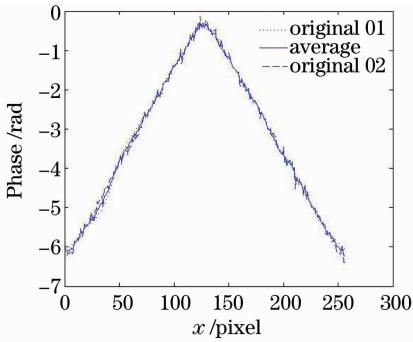


图 8 测量精度

Fig. 8 Measurement accuracy

5 实 验

用计算机产生一个 x, y 方向空间周期为 4 个像素的二维网格正弦电子光栅, 通过数字投影仪投射到待测物体上。经过物体调制, 产生一个二维变形网格光栅 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$, 为了提高计算速度, 截取图像尺寸为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 如图 9 所示。应用二维伽博小波变换, 检测小波变换脊, 逐点提取二维变形光栅条纹中的两个包裹相位, 小波尺度范围取 $2 \sim 8$, 步长为 0.25, 提取的垂直条纹的包裹相位旋转角为 $(-\frac{\pi}{18}, 0, \frac{\pi}{18})$, 提取的水平条纹的

包裹相位旋转角为 $(\frac{4\pi}{9}, \frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{9})$, 提取的垂直条纹和水平条纹的包裹相位分别如图 10(a), (b) 所示。进而应用查表法进行解包处理, 得到 x, y 方向条纹的解包相位, 分别如图 11(a), (b) 所示。由于二维伽博小波变换对每个像素点需要计算不同小波尺度和不同旋转角的二维伽博小波变换结果后比较获得小波变换脊的位置, 对于大尺寸的图像, 如果小波尺度步长和旋转角间隔很小, 计算时间将比较长; 实践表明, 旋转角的间隔没有必要设置得很小; 为了提高处理速度, 图像的像素数目最好是 2 的指数倍。

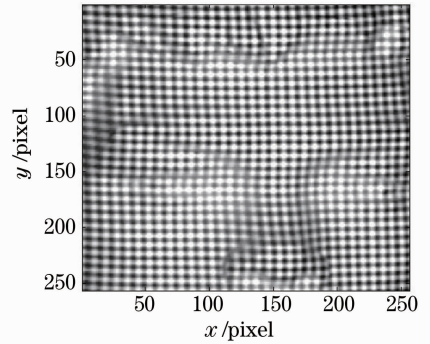


图 9 二维变形光栅条纹

Fig. 9 2D deformed grid-grating pattern

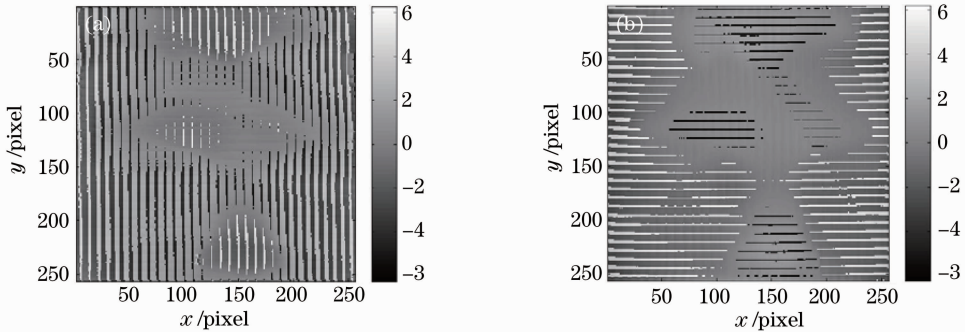


图 10 (a)垂直条纹和(b)水平条纹的包裹相位分布

Fig. 10 Wrapped phase distributions of (a) vertical and (b) horizontal fringes

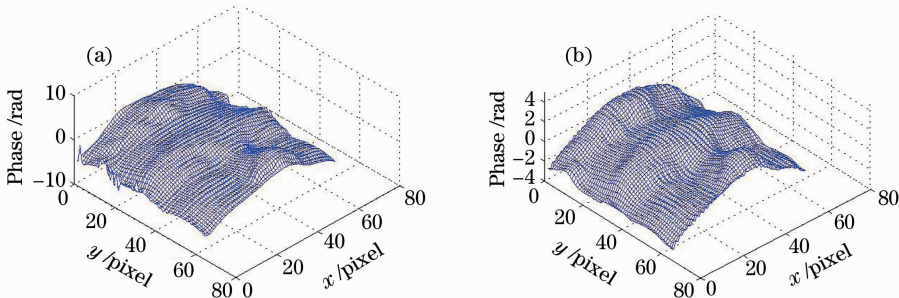


图 11 (a)垂直条纹和(b)水平条纹的展开相位分布

Fig. 11 Unwrapped phase distributions of (a) vertical and (b) horizontal fringes

6 结 论

提出基于伽博小波变换的二维载频条纹轮廓术。采用一个二维网格光栅条纹进行光学传感,不用设计带通滤波器,通过检测小波变换脊,采用二维伽博小波变换直接提取二维载频变形网格 x, y 方向的一维变形条纹的调制相位,并结合查表进行相位解包。与一维单频光栅比较,二维网格光栅采用两个独立光栅可以获得两倍测量数据,提高测量精度;与一维双频光栅比较,二维网格光栅两个方向的一维光栅相互独立,可以避免产生频谱混叠;与一维双频光栅两个同方向光栅频率无法相同比较,二维网格光栅两个方向的一维光栅的频率可以相同,因而可得到相同的测量精度;只需要一幅变形光栅,即可有效地测量陡峭物体的三维面形。

参 考 文 献

- 1 Y. Hao, Y. Zhao, D. Li. Multifrequency grating projection profilometry based on nonlinear excess fraction method [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(19): 4106~4110
- 2 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
- 3 Mitsuo Takeda, Kazuhiro Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- 4 Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu. Analysis on an improved fourier transform profilometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 97~102
毛先富, 陈文静, 苏显渝. 傅里叶变换轮廓术新理论研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 97~102
- 5 Jiawen Weng, Jingang Zhong. Application of gabor transform to 3D shape analysis [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 993~996
翁嘉文, 钟金钢. 加窗傅立叶变换在三维形貌测量中的应用[J]. *光子学报*, 2003, **32**(8): 993~996
- 6 P. Huang, S. Zhang. Fast three-step phase-shifting algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(21): 5086~5091
- 7 Fujun Yang, Xiaoyuan He. Two-step Phase-shifting fringe projection profilometry: intensity derivative approach [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(29): 7172~7178
- 8 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
- 9 Jingang Zhong, Jiawen Weng. Phase retrieval of optical fringe patterns from the ridge of a wavelet transform [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(19): 2560~2562
- 10 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
- 11 Weng Jiawen, Zhong Jingang. Apply wavelet transform phase analysis of spatial carrier-fringe patterns [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 454~459
翁嘉文, 钟金钢. 小波变换在载频条纹相位分析法中的应用 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 454~459
- 12 Ruihua Zheng, Yuxiao Wang, Xueru Zhang *et al.*. Two-dimensional phase-measuring profilometry [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(6): 954~958
- 13 K. Kadooka, K. Kunoo, N. Uda *et al.*. Strain analysis for moiré interferometry using the two-dimensional continuous wavelet transform [J]. *Exp. Mech.*, 2003, **43**(1): 45~51
- 14 Zhaoyang Wang, Huanfeng Ma. Advanced continuous wavelet transform algorithm for digital interferogram and processing [J]. *Opt. Engng*, 2006, **45**(4): 1~5
- 15 M. A. Gdeisat, D. R. Burton, M. J. Lalor. Spatial carrier fringe pattern demodulation by use of a two-dimensional continuous wavelet transform [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(34): 8722~8732
- 16 A. Z. Abid, M. A. Gdeisat, D. R. Burton *et al.*. Spatial fringe pattern analysis using the two-dimensional continuous wavelet transform employing a cost function [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(24): 6120~6126