

文章编号: 1001-4888(2017)01-0027-08

基于任意系统位置关系的投影 云纹形貌测量技术研究^{*}

姚骏, 唐颖, 陈巨兵

(上海交通大学力学系, 上海 200240)

摘要: 提出了一套完整的基于投影云纹系统的物体表面形貌测量方法, 包括理论公式推导、系统线性近似误差分析、全场灵敏度系数标定方法、实际物体的实验测量结果。所提出的方法既不需要特定的系统硬件位置关系设置, 也无需人为确定系统的几何参数。该方法在允许测量系统组件任意放置的情况下仍然能够获得很高的分辨率和精度, 其有效性及正确性通过真实物体的实验得到证实。

关键词: 投影云纹; 表面形貌; 误差分析; 灵敏度系数

中图分类号: O348.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-056

0 引言

几何云纹法是 20 世纪 70 年代发展起来的一种现代光学测量技术, 多用于面内变形、离面位移、表面形貌的检测^[1,2]。凭借非接触、快速、全场测量、高分辨率、高精度的优势, 几何云纹法被广泛应用于生物、医学检测、产品检测、逆向工程等众多领域^[3-10]。

云纹现象是由频率相近的两块光栅或者是栅结构相互重叠, 发生几何干涉而产生的。当其中任意一块栅产生变形或发生相对位置变化时, 云纹条纹也随之变化。由于所产生的云纹条纹的频率远低于所使用的栅的频率, 因而利用该现象可以将变形无失真地放大, 从而极大地提高测量分辨率, 这也是云纹法的最大优势。根据光路设置的不同, 离面几何云纹法通常可以分为两类: 影像云纹法和投影云纹法。影像云纹法的光路设置更为简单, 但是该方法的测试面积仅能达到与所使用光栅差不多的大小, 因而投影云纹法的应用更广。在投影云纹方法中, 光源出射光经过投影光栅的调制后投影到被测物体表面形成栅线, 受表面高度调制的畸变的栅线再由成像系统成像到参考光栅平面, 并叠合形成云纹, CCD 相机对参考光栅成像记录云纹。物体表面的高度信息蕴含在云纹条纹的位相中, 利用相移技术可以提取条纹的位相。

现有的投影云纹方法理论模型并不具有普遍性, 通常对系统的光路设置有一些特定的要求^[11-13]。例如, 投影系统与接收系统的光轴平行且垂直于参考平面; 投影镜头与成像镜头焦距相同; 投影光栅与参考光栅距离参考平面相等的距离等。实际测量时, 需要通过人为的不断测量和调整来满足这些条件, 一旦这些条件不能够精确满足, 必然会引入误差。除此之外, 这样的“正投正收”系统也限制了测量面积的大小。本文中, 我们提出了基于任意坐标系下投影云纹方法的表面形貌测量方法, 包括理论公式推导、系统非线性特性分析、全场灵敏度系数标定、实际物体的实验测量结果。

^{*} 收稿日期: 2016-03-30; 修回日期: 2016-05-31

基金项目: 本研究由国家自然科学基金 No. 11372182 支持

通讯作者: 陈巨兵 (1966—), 男, 教授, 博士生导师。主要从事实验固体力学及光学测试技术研究。Email: jibchen@sjtu.edu.cn

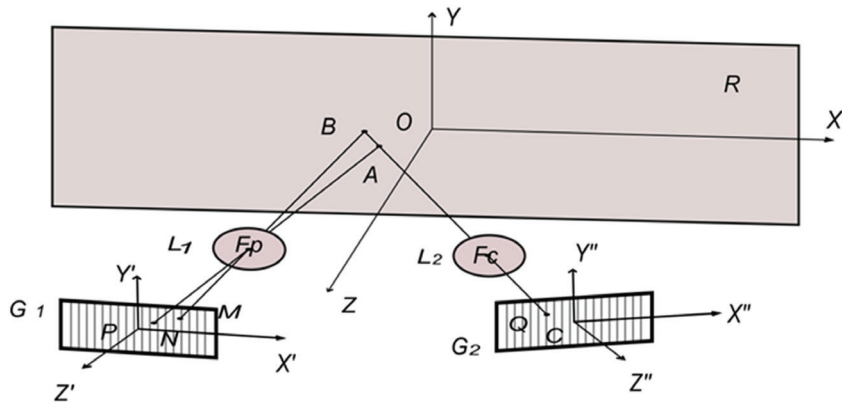


图 1 任意坐标系下的投影云纹系统光路

Fig. 1 Schematic illustration of a generalized projection moiré system

1 任意坐标系下的投影云纹方法理论

图 1 描述了任意坐标系下的投影云纹系统光路设置,共建立了 $OXYZ$, $PX'Y'Z'$, $CX''Y''Z''$ 三个坐标系来表征系统内各元件的相对位置关系。 $OXYZ$ 坐标系固定在参考平面 R 上, $PX'Y'Z'$ 与 $CX''Y''Z''$ 坐标系分别固定在光栅 G_1 与 G_2 上。镜头 L_1 的中心点 F_p 在 $PX'Y'Z'$ 坐标系中的坐标为 $(0, 0, -f_1)$, f_1 为镜头 L_1 的焦距;镜头 L_2 的中心点 F_c 在 $CX''Y''Z''$ 坐标系中的坐标为 $(0, 0, -f_2)$, f_2 为镜头 L_2 的焦距。空间任意一点从 $OXYZ$ 坐标系到 $PX'Y'Z'$ 或 $CX''Y''Z''$ 坐标系的坐标变换关系可以描述为:

$$\begin{bmatrix} x' & y' & z' \end{bmatrix}^T = R_1 \begin{bmatrix} x - x_P & y - y_P & z - z_P \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x'' & y'' & z'' \end{bmatrix}^T = R_2 \begin{bmatrix} x - x_C & y - y_C & z - z_C \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

式中 (x_P, y_P, z_P) , (x_C, y_C, z_C) 分别是两个坐标系原点 P 和 C 在 $OXYZ$ 坐标系下的坐标,旋转变换矩阵 $R_i (i=1, 2)$ 由下式定义:

$$R_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & \sin \alpha_i \\ 0 & -\sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \beta_i & 0 & \sin \beta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_i & 0 & \cos \beta_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \gamma_i & \sin \gamma_i & 0 \\ -\sin \gamma_i & \cos \gamma_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 分别是关于 X, Y, Z 轴的旋转角。为方便后续推导,我们定义:

$$R_1 = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{bmatrix}, R_2^{-1} = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_3 \\ d_4 & d_5 & d_6 \\ d_7 & d_8 & d_9 \end{bmatrix} \quad (4)$$

设点 A 是物体表面距离参考平面高度为 h 的任意一点,直线 AF_c 交参考平面 R 于点 B ,显然,点 A 与点 B 在图像中对应同一像素点,设点 B 在 $OXYZ$ 坐标系下的坐标为 $(x_B, y_B, 0)$ 。根据公式(2)可得点 F_c 在 $OXYZ$ 坐标系下的坐标:

$$\begin{bmatrix} x_{F_c} \\ y_{F_c} \\ z_{F_c} \end{bmatrix} = R_2^{-1} \begin{bmatrix} x''_{F_c} \\ y''_{F_c} \\ z''_{F_c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_C - d_3 f_2 \\ y_C - d_6 f_2 \\ z_C - d_9 f_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

结合 AF_c 的直线方程

$$\frac{x - x_B}{x_{F_c} - x_B} = \frac{y - y_B}{y_{F_c} - y_B} = \frac{z}{z_{F_c}} \quad (6)$$

很容易地可以导出点 A 与点 B 的坐标对应关系:

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_{F_c} - x_B)h/z_{F_c} + x_B \\ (y_{F_c} - y_B)h/z_{F_c} + y_B \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 h + x_B \\ \lambda_2 h + y_B \\ h \end{bmatrix} \quad (7)$$

测量时,光源出射的光通过投影光栅 G_1 后由镜头 L_1 投影到参考平面上形成栅线,来自光栅 G_1 上点 M 的光被投影到点 $B(x_B, y_B, 0)$ 的位置。物面反射的光通过镜头 L_2 成像到参考光栅 G_2 处,来自点 B 的光照射到参考光栅 G_2 上的 Q 点。CCD 相机再对参考光栅 G_2 成像,观察到的 B 点对应像素点的光强为:

$$I_B = I_0 \rho_1 \rho_2 R \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left[\frac{2\pi x'_M}{p} + \phi_1 \right] \right] \times \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left[\frac{2\pi x''_Q}{p} + \phi_2 \right] \right] \quad (8)$$

式中, I_0 为初始光强度; ρ_1, ρ_2 表示光通过镜头 L_1 和 L_2 产生的光强度衰减; R 为点 B 处的反射率; p 为光栅节距; ϕ_1 和 ϕ_2 为由于坐标系原点选取引入的初始相位偏差。令 $A = I_0 \rho_1 \rho_2 R$, 将公式(8)展开为:

$$I_B = \frac{A}{4} \left\{ \begin{aligned} &1 + \sin \left[\frac{2\pi x'_M}{p} + \phi_1 \right] + \sin \left[\frac{2\pi x''_Q}{p} + \phi_2 \right] \\ &- \frac{1}{2} \cos \left[\frac{2\pi(x'_M + x''_Q)}{p} + \phi_1 + \phi_2 \right] + \frac{1}{2} \cos \left[\frac{2\pi(x'_M - x''_Q)}{p} + \phi_1 - \phi_2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

公式(9)中,第二、三、四项均为空间高频成分,视为栅线噪声^[11]。只有第五项是空间低频成分,对应实际的云纹条纹,关于如何从原始条纹图像中去除栅线噪声以提取云纹条纹,可参考文献[11,14,15]。 B 点所对应的云纹条纹光强应为:

$$I_{BM} = \frac{A}{8} \cos \left[\frac{2\pi(x'_M - x''_Q)}{p} + \phi_1 - \phi_2 \right] \quad (10)$$

类似的,我们可以得到物体表面 A 点对应的云纹条纹光强:

$$I_{AM} = \frac{A}{8} \cos \left[\frac{2\pi(x'_N - x''_Q)}{p} + \phi_1 - \phi_2 \right] \quad (11)$$

利用相移技术,可以提取点 B 和点 A 的条纹位相,相移是通过参考光栅沿其主方向的面内平动实现的。那么,由于物体表面高度变化引起的位相变化可以表示为:

$$\psi = \phi_{dj} - \phi_{nf} = \phi_A - \phi_B = \frac{2\pi}{p}(x'_N - x'_M) \quad (12)$$

再结合 BF_P, AF_P 的直线方程,并将公式(1)、(2)、(7)带入公式(12),可以导出:

$$\psi = \frac{2\pi}{p}(x'_N - x'_M) = \frac{ah}{1+bh} \quad (13)$$

其中

$$b = \frac{a_7 \lambda_1 + a_8 \lambda_2 + a_9}{a_7(x_B - x_P) + a_8(y_B - y_P) + a_9 z_P + f_1} \quad (14)$$

$$a = \frac{2\pi f_1(a_1 \lambda_1 + a_2 \lambda_2 + a_3)}{p[a_7(x_B - x_P) + a_8(y_B - y_P) - a_9 z_P + f_1]} - \frac{2\pi f_1(a_7 \lambda_1 + a_8 \lambda_2 + a_9)[a_1(x_B - x_P) + a_2(y_B - y_P) - a_3 z_P]}{p[a_7(x_B - x_P) + a_8(y_B - y_P) - a_9 z_P + f_1]^2} \quad (15)$$

2 线性近似误差分析及全场灵敏度系数标定

公式(13)表明了物体表面任意一点的离面高度与位相增量的关系,系数 a, b 是由系统多个参数和参考点 B 的坐标决定的变量。基于上文中推导的理论模型,我们选取了多组系统参数组合来模拟计算全场对应的系数 a, b 。具体的参数选取及模拟结果见表 1。

从表 1 的模拟结果可以看出,各组模拟实验中得出的全场系数 b 的平均值均小于 0.01,同时标准差几乎为零。这一结果表明系统的非线性特性很弱,因此我们进行了另一个模拟实验来研究将系统近似为线性($b(i, j) \approx 0$)的可能性。以表 1 中第 14 组为例,我们生成了参考平面与物体(厚度 10mm 的平板)相对应的云纹图像,如图 2。随后利用近似后的线性关系计算平板的高度,所得到的平板厚度平均值为 10.0126mm,标准差为 $2.57e^{-7}$ mm。其他各组参数的模拟结果统计见表 2。表 2 中各组的模拟结果表明,系统线性近似引起的测量误差均小于 3%,如此小的误差在实际测量中是可以忽略不计的。因此,公式(13)可以近似为:

$$\psi(i, j) = \frac{a(i, j)h(i, j)}{1 + b(i, j)h(i, j)} \approx a(i, j)h(i, j) \quad (16)$$

表 1 参数设置及模拟结果
Tab.1 Parameters setting and simulation results

Group No.	System parameters (units: degree, millimeter)						Measure area	a(i, j)		b(i, j)	
	α, β, γ	ω, β, γ	f_1, f_2	x_P, y_P, z_P	x_C, y_C, z_C	p		AVG	SD	AVG	SD
1	0,0,0	0,0,0	100,100	-50,0,200	50,0,200	0.05	50×50	-125.66	1.32e ⁻¹²	-0.01	2.09e ⁻¹⁶
2	0,0,0	0,0,0	100,100	-50,0,200	50,0,200	0.02	50×50	-314.16	9.72e ⁻¹²	-0.01	2.09e ⁻¹⁶
3	0,0,0	0,0,0	95,100	-50,0,200	50,0,200	0.05	50×50	-110.99	1.5645	-0.0095	3.29e ⁻¹⁷
4	0,0,0	0,0,0	100,100	-50,0,500	50,0,500	0.02	200×200	-19.635	6.07e ⁻¹³	-0.0025	5.24e ⁻¹⁷
5	0,0,0	0,0,0	50,50	-50,0,2000	50,0,2000	0.02	1500×1500	-0.4131	9.98e ⁻¹⁵	-5.12e ⁻⁴	1.71e ⁻¹⁷
6	0,0,0	0,0,0	35,35	-50,0,4000	50,0,4000	0.02	3000×3000	-0.0699	2.47e ⁻¹⁵	-2.52e ⁻⁴	7.64e ⁻¹⁸
7	0,0,0	1,1,1	100,100	-50,0,200	50,0,200	0.05	50×50	-127.79	0.0111	-0.01	2.09e ⁻¹⁶
8	1,1,1	0,0,0	50,50	-50,0,2000	50,0,2000	0.02	1500×1500	-0.4094	0.0071	-5.12e ⁻⁴	4.91e ⁻⁹
9	1,1,1	0,0,0	50,50	-50,0,2000	50,0,2100	0.02	1500×1500	-0.3966	0.1686	-5.12e ⁻⁴	2.69e ⁻⁷
10	1,1,1	1,1,1	35,35	-50,0,4000	50,0,4000	0.02	3000×3000	-0.0699	0.0012	-2.52e ⁻⁴	1.18e ⁻⁹
11	0,0,0	3,3,3	100,100	-50,0,200	50,0,200	0.05	50×50	-131.69	0.0992	-0.01	2.09e ⁻¹⁶
12	3,3,3	0,0,0	50,50	-50,0,2000	50,0,2000	0.02	1500×1500	-0.4032	0.0206	-5.12e ⁻⁴	4.18e ⁻⁸
13	3,3,3	0,0,0	35,50	-50,0,3000	50,0,4000	0.02	3000×3000	-0.0741	0.5422	-3.37e ⁻⁴	3.64e ⁻⁶
14	3,3,3	3,3,3	35,35	-50,0,4000	50,0,4000	0.02	3000×3000	-0.0702	0.0035	-2.52e ⁻⁴	1.03e ⁻⁸
15	0,0,0	9,9,9	100,100	-50,0,200	50,0,200	0.05	50×50	-139.88	0.8674	-0.01	2.09e ⁻¹⁶
16	9,9,9	0,0,0	50,50	-50,0,2000	50,0,2000	0.02	1500×1500	-0.3931	0.0598	-5.09e ⁻⁴	3.21e ⁻⁷
17	9,9,9	9,9,9	35,35	-50,0,4000	50,0,4000	0.02	3000×3000	-0.0725	0.0109	-2.51e ⁻⁴	8.46e ⁻⁸

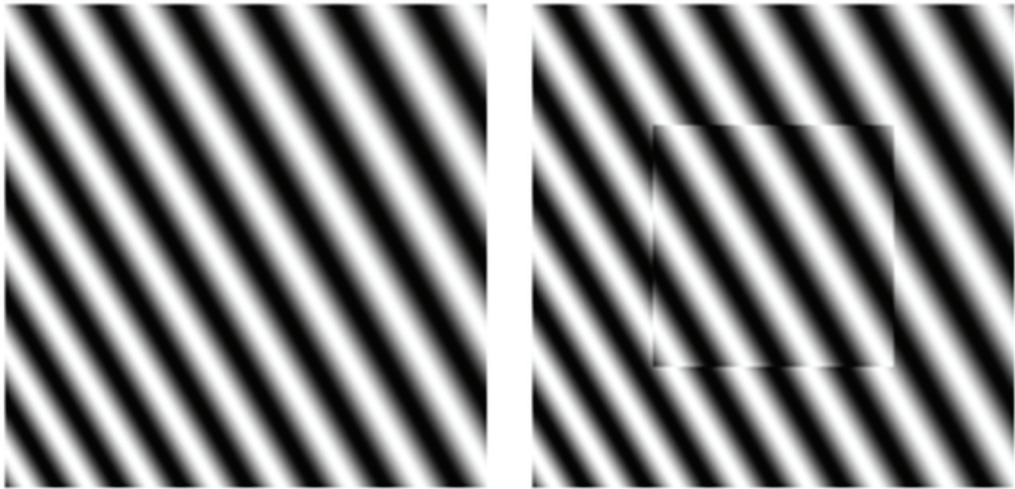


图 2 计算机模拟的云纹图像:参考平面(左),物体(右)

Fig.2 Computer simulated moiré patterns: reference plane (left), object (right)

需要指出的是全场灵敏度系数 $a(i, j)$ 并不是一个常数,通过精确测量系统的每一个参数进而确定灵敏度系数是不现实。一种更为简便且实用的方法是,通过比较在 Z 方向上移动了已知距离的两次被测面的位相变化来标定灵敏度系数。具体的标定步骤如下:首先将标定平面放置在 $z=0$ 处,测量其对应的全场位相分布 $\phi_0(i, j)$;然后,使标定平面沿 Z 方向移动一段已知距离 h ,测量该状态下对应的全场位相分布 $\phi_h(i, j)$ 。根据下式计算全场灵敏度系数:

$$a(i, j) = \frac{\phi_h(i, j) - \phi_0(i, j)}{h} \tag{17}$$

表 2 线性近似所产生误差的模拟结果

Tab. 2 Simulation result of error caused by linear approximation

Operation conditions	Thickness of plate (mm)	Measured thickness (mm)		Error		
		AVG	SD	AVG	SD	Percentage
1	0.01	0.01	8.42e^{-15}	5.01e^{-7}	8.42e^{-15}	0.050‰
2	0.005	0.005	4.03e^{-15}	1.25e^{-7}	4.03e^{-15}	0.025‰
3	0.01	0.01	2.55e^{-14}	4.76e^{-7}	2.55e^{-14}	0.048‰
4	0.1	0.1	9.85e^{-14}	1.25e^{-5}	9.85e^{-14}	0.125‰
5	4	4.0041	1.84e^{-12}	0.0041	1.84e^{-12}	1.027‰
6	20	20.0507	7.16e^{-12}	0.0507	7.16e^{-12}	2.528‰
7	0.01	0.01	2.22e^{-14}	5.01e^{-7}	2.22e^{-14}	0.050‰
8	4	4.0041	1.97e^{-8}	0.0041	1.97e^{-8}	1.026‰
9	4	4.0041	1.08e^{-6}	0.0041	1.08e^{-6}	1.026‰
10	20	20.0507	1.19e^{-7}	0.0507	1.19e^{-7}	2.527‰
11	0.01	0.01	2.16e^{-14}	5.01e^{-7}	2.16e^{-14}	0.050‰
12	4	4.0041	1.68e^{-7}	0.0041	1.68e^{-7}	1.024‰
13	2	2.0007	3.63e^{-6}	6.74e^{-4}	3.63e^{-6}	0.337‰
14	10	10.0126	2.57e^{-7}	0.0126	2.57e^{-7}	1.261‰
15	0.01	0.01	3.05e^{-14}	5.01e^{-7}	3.05e^{-14}	0.050‰
16	4	4.0041	1.26e^{-6}	0.0041	1.26e^{-6}	1.021‰
17	20	20.0505	8.35e^{-6}	0.0505	8.35e^{-6}	2.519‰

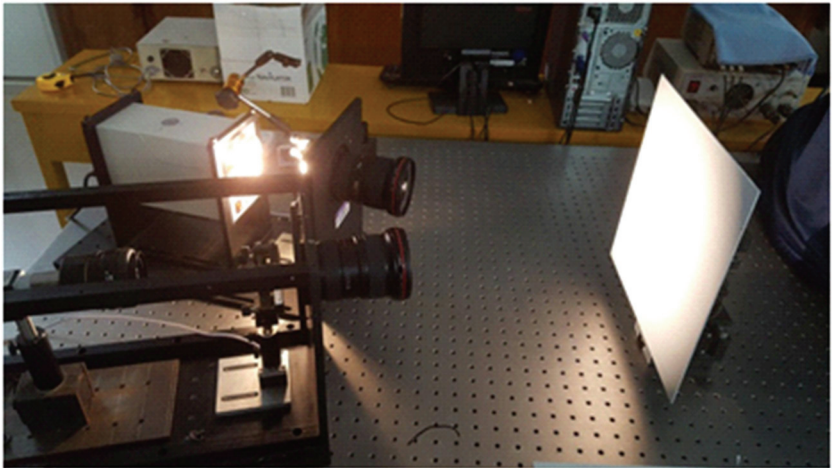


图 3 实际测量系统组成

Fig. 3 Actual measuring system

3 实验

为了验证本文所提出方法的有效性,我们进行了实验,实际测量系统如图 3 所示。实验采用的测量系统可以分为两部分:投影系统与接收系统。投影系统由卤素灯光源、投影光栅、商用变焦距短焦镜头组成;接收系统由 CCD 相机、参考光栅、另一短焦镜头组成。卤素灯光源的功率为 150W,白光;投影与参考光栅为美国 Edmund Optics 公司生产的标准光栅,密度为 750 线/英寸;变焦距短焦镜头为 CAN-

NON 公司 EF 系列镜头,变焦范围 16~35mm;CCD 相机为德国 Basler 公司生产的 acA1600-20 μm 型相机,最大分辨率 1626 $\times$ 1236 像素。通过投影系统将光栅投影到被测物体表面,再由接收系统将物体表面的栅线成像到参考光栅上,形成云纹,并由 CCD 相机拍摄记录。实验中,投影系统与接收系统是任意放置的,两系统的光轴夹角大约为 20°。被测物体为一银行卡,卡片放置的位置距离测量系统大约 750mm。图 4 所示为实验采集的云纹条纹图像,图像中的高频栅线噪声已经利用离散栅线平均的方法从原始图像中去除了^[15]。相移算法采用的是经典的四步相移算法,相移是通过高精度 PZT 平动台驱动参考光栅面内移动实现的。系统的全场灵敏度系数分布标定结果如图 5 所示。很显然,全场灵敏度系数不是常数,变化范围从-1.552 到-1.985。重建的卡片三维形貌如图 6 所示,从图中可以清楚地识别出凸出的该卡的编号。图 4 中第 300 行的离面位移数据如图 7 所示,理论上该行的离面位移值应为零,因为图 4 背景区域(未放置银行卡区域)没有任何的离面位移。因此,这些数据实际上是代表了系统的测量误差。通常,我们用均方根值(RMS)来评价误差大小,该行的 RMS 值仅为 0.0067mm。

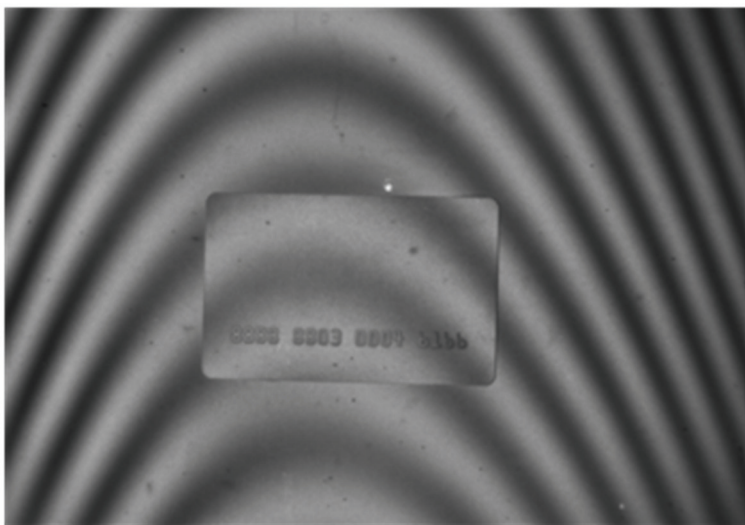


图 4 物体的云纹图像

Fig. 4 Moiré pattern of tested object

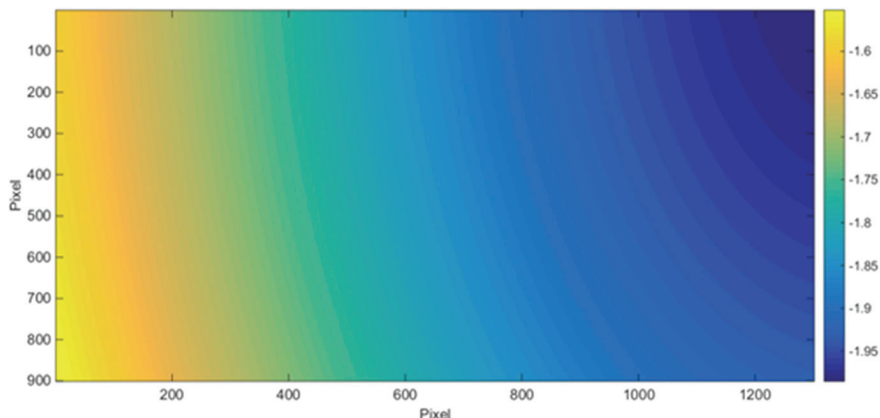


图 5 全场灵敏度系数标定结果

Fig. 5 Full-field sensitivity coefficient calibration result

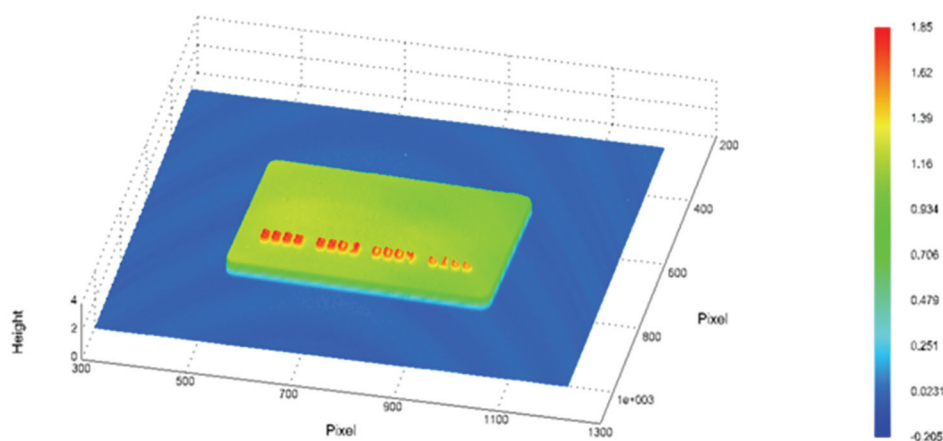


图6 物体三维形貌重建结果

Fig. 6 Reconstructed object 3-D shape

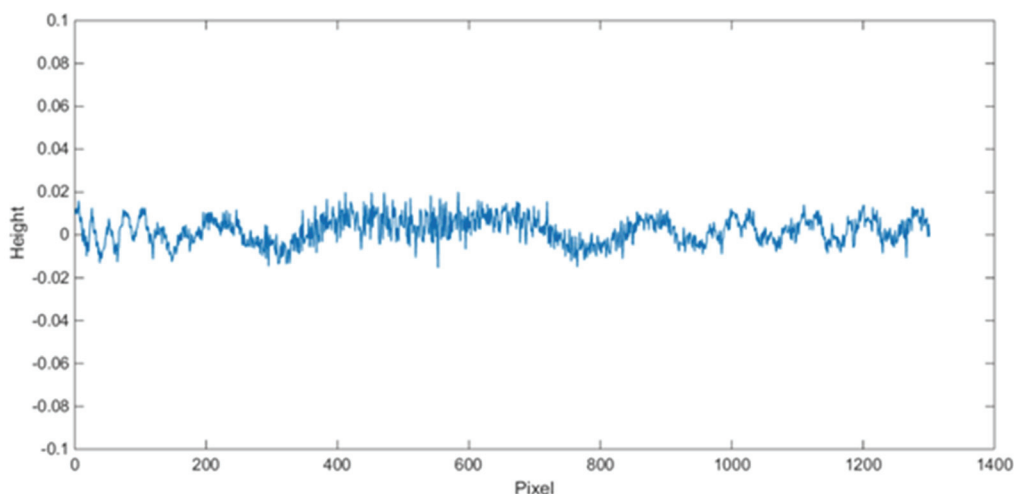


图7 图4中第300行的离面位移数据

Fig. 7 Out-of-plane displacement data of 300th row in Fig. 4

4 结论

本文提出了一套完整的基于投影云纹方法的物体表面形貌测量方法,理论推导了物体表面高度与条纹位相的关系,利用计算机模拟对系统线性近似带来的测量误差进行了研究,结果证明了线性近似的可行性。同时,提出了一种简单可靠的全场灵敏度系数标定方法。本文提出的方法为投影云纹法在实际测量中的应用提供了理论基础,实验结果也证明了其有效性。该方法适用于现有的任何投影云纹系统,同时有助于提高测量精度和增加测量面积。

参考文献:

- [1] Meadows D M, Johnson W O, Allen J B. Generation of surface contours by moiré patterns[J]. Applied Optics, 1970, 9(4):942—947.
- [2] Takasaki H. Moiré topography[J]. Applied Optics, 1970, 9(6):1467—1472.
- [3] Boccaccio A, Martino F, Pappalettere C. A novel moiré-based optical scanning head for high-precision contouring [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(1-4):47—63.
- [4] 朱建雄, 周国梁. 投影云纹法在研究加劲板后屈曲平衡路径及后屈曲模态转化过程的应用[J]. 实验力学, 1986, 1(4):94—97 (ZHU Jianxiong, ZHOU Guoliang. An application of a moiré method in studying the post buckling

- displacements and modal changes of a stiffened plate[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1986, 1(4):94—97 (in Chinese))
- [5] Dirckx J J, Decraemer W F. Optoelectronic moiré projector for real-time shape and deformation studies of the tympanic membrane[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 1997, 2(2):176—185.
- [6] Gomes P F, Sesselmann M, Faria C D C M, et al. Measurement of scapular kinematics with the moiré fringe projection technique[J]. *Journal of Biomechanics*, 2010, 43(6):1215—1219.
- [7] 王鸣, 马力. 用投影云纹偏转测定气体的温度场[J]. *光学学报*, 1993(3):277—280 (WANG Ming, MA Li. Projection moiré deflectometry for mapping phase objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 1993(3): 277—280 (in Chinese))
- [8] 米红林. 基于影栅云纹的大变形测量及应用[J]. *光学技术*, 2013(2):124—127 (MI Honglin. Large deformation measurement and its application based on shadow moiré[J]. *Optical Technique*, 2013(2):124—127 (in Chinese))
- [9] Chen L C, Tsai L H. Dual phase-shifting moiré projection with tunable high contrast fringes for three-dimensional microscopic surface profilometry[J]. *Physics Procedia*, 2011, 19:67—75.
- [10] Kim S W, Choi Y B, Oh J T. Reverse engineering: high speed digitization of free-form surfaces by phase-shifting grating projection moiretopography[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1999, 39(3): 389—401.
- [11] Buytaert J A N, Dirckx J J. Design considerations in projection phase-shift moiré topography based on theoretical analysis of fringe formation[J]. *Josa A*, 2007, 24(7):2003—2013.
- [12] Choi Y B, Kim S W. Phase-shifting grating projection moiré topography[J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(3): 1005—1010.
- [13] Buytaert J A N, Ribbens B, Vanlanduit S, et al. Aberration-free moiré profilometry-Analysis, simulation and implementation of the optimal setup geometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(8):1119—1129.
- [14] Halioua M, Krishnamurthy R S, Liu H, et al. Projection moiré with moving gratings for automated 3-D topography[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(6):850—855.
- [15] Buytaert J A N, Dirckx J J. Moiré profilometry using liquid crystals for projection and demodulation[J]. *Optics Express*, 2008, 16(1):179—193.

On the Measurement Technique of Projection Moiré Topography Based on the Arbitrarily System Position Relation

YAO Jun, TANG Ying, CHEN Ju-bing

(Department of Engineering Mechanics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A complete set of object surface topography measurement methods is presented in this paper, based on projection moiré system, which includes the theoretical formula derivation, the analysis of system linear approximation error, the whole field sensitivity coefficient calibration method and the experimental results of actual objects. The proposed method does not require a specific system hardware location relation setup and is not necessary to artificially determine system geometric parameters. This method can still obtain high resolution and precision under the condition of arbitrary placement of measurement system components. Its validity and correctness were confirmed by the experiment of real object.

Keywords: projection moiré; surface topography; error analysis; sensitivity coefficient