

文章编号: 1001-4888(2018)05-0665-10

# 一种基于投影云纹法的三维形貌 测量技术及其标定方法\*

唐颖, 姚骏, 陈巨兵

(上海交通大学力学系, 上海 200240)

**摘要:** 投影云纹法测量物体的三维形貌具有非接触式、快速、全场测量的优势, 且计算结果的分辨率和精度都很高。本文提出了一种新的投影云纹系统测量三维形貌的计算和标定方法, 这种方法适用于由投影仪直接投影栅线的投影云纹系统, 对光路没有特殊相对位置要求, 标定过程对设备的要求低, 简单易行, 仅需一大一小两块平整的标定板即可实现对整个系统的标定。其可行性、正确性以及高精度的特点都被真实物体测量证实。

**关键词:** 投影云纹; 表面形貌; 灵敏度系数; 系统标定

**中图分类号:** O348.1      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-116

## 0 引言

云纹法在 20 世纪 70 年代被提出<sup>[1,2]</sup>, 是一种非接触式、全场的高灵敏度的光学测量方法。云纹的本质是两块频率相近的栅结构发生几何干涉而形成的明暗相间的云纹图像。由于所产生的云纹条纹频率远低于形成过程中栅的频率, 因而云纹法可以将变形无失真地放大, 提高测量灵敏度。本文所探讨的投影云纹是将栅线投影到试件表面形成试件栅, 因试件的凹凸起伏而发生畸变的栅线经成像后与另一块参考栅重叠而产生云纹图案, 再通过相移法<sup>[3-6]</sup>计算出云纹的相位, 只要找到相位和坐标的关系, 就可以从相位信息反算出被测试件的三维形貌信息。

半个世纪以来, 科研工作者们对投影云纹进行了大量的研究, 取得了很多进展。投影云纹技术被广泛应用于各个领域<sup>[7-13]</sup>, 如: 用投影云纹法检测不同角度的气流下机翼的形变<sup>[7]</sup>, 中学生是否有结构性脊柱侧弯<sup>[9]</sup>, 用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<sup>[10]</sup>, 还有人用投影云纹测量气体的温度场<sup>[11]</sup>。但是这些方法所涉及到的投影云纹光路以及相位和高度的关系式不具备普适性, 它们中的绝大多数都要求投影栅和接收栅平行于参考平面<sup>[4-6]</sup>, 还有个别要求两套投影系统在接收系统两侧严格对称<sup>[13]</sup>或者要求接收系统垂直于参考平面<sup>[14]</sup>。在计算相位和高度的关系时, 除了少数对光路有严格要求的方法可以通过测量一些特定角度和距离来得到这个关系<sup>[13-15]</sup>, 其余的大多数都是通过预实验来标定相位和高度的关系<sup>[6,16-19]</sup>。这种标定一般通过平移标定板并测量每个位置下的云纹相位来实现, 这就对实验装置提出了要求并限制了系统的实际应用。除此以外, 物体相位和参考面相位还存在一个像素不匹配的问题。假设有一条垂直于参考平面的线段, 且它的其中一个端点恰好在该参考平面上, 只有当线段所在直线恰好是成像系统的光轴时, 线段的两个端点在所采图像上才是同一点, 且线段距离光轴越远, 它的两端在图像上对应的像素也离得越远。为了使云纹法测量三维形貌能具

\* 收稿日期: 2017-05-19; 修回日期: 2017-06-23

基金项目: 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

有更广泛的应用并解决像素不匹配的问题,我们建立了一个具有一般性的投影云纹模型,这个模型对光路内各种部件之间的相对位置关系不作任何要求。依据这个模型推导出相位和坐标的关系,就可以由相位信息获得待测物体的三维形貌信息。为了得到模型所涉及的很多系统参数,我们借鉴了前人在相机标定<sup>[20-23]</sup>以及投影条纹方法中对投影仪和相机的参数标定<sup>[24-26]</sup>中所运用的方法,提出了针对投影云纹系统的标定方法。此方法适用于所有由投影仪投影栅线到待测试件表面的云纹系统。经实验验证,该方法简单易行、精度高,同时对光路以及设备的要求很低,测量范围可大可小,具有较强的可操作性。

## 1 投影云纹系统理论模型

图1是一幅投影云纹系统的示意图,将这个系统简单分为三块:投影系统、接收系统和参考平面,测量物体时将待测试件放在参考平面处即可。投影系统实际上就是一个投影仪,为了表述方便,把它拆分成光源、光栅G1、透镜L1。接收系统最前端是一个广角镜头,对应于图中的L2,这个镜头将投影到参考平面上的栅线再次成像,在参考栅G2上投影栅线的像和G2本身发生几何干涉形成云纹,置于G2后的图像传感器(CCD)将此云纹记录下来。参考栅G2被固定在一个高精度的压电陶瓷控制的平动装置(PZT)上,实验中我们通过PZT来控制光栅G2平动从而实现相移,由若干次相移所记录下的云纹图案即可计算云纹图中每一点的相位。

首先,分别对参考平面、投影系统和接收系统建立坐标系:参考平面坐标系  $OXYZ$ ,其中  $XOY$  平面与参考平面重合;投影系统坐标系  $O_1X_1Y_1Z_1$ ,其中  $O_1Z_1$  轴即为光轴;接收系统坐标系  $O_2X_2Y_2Z_2$ ,  $O_2Z_2$  是广角镜头的光轴。通过坐标系转换,可以把参考平面内任意一点  $(X, Y, Z)$  在  $OXYZ$  下的坐标

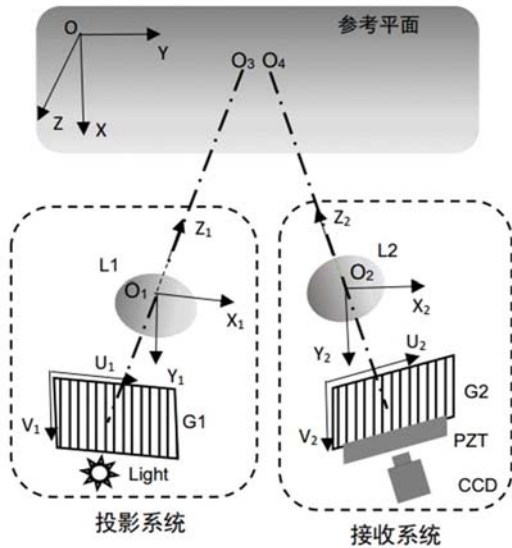


图1 投影云纹系统示意图

Fig. 1 Schematic illustration of a generalized projection moiré system

换算成该点在另两个参考系下的坐标:

$$[X_1, Y_1, Z_1]^T = R_1[X, Y, Z]^T - T_1 \quad (1)$$

$$[X_2, Y_2, Z_2]^T = R_2[X, Y, Z]^T - T_2 \quad (2)$$

其中,  $R_1$ 、 $R_2$  和  $T_1$ 、 $T_2$  分别是参考平面坐标系变换到投影系统坐标系以及接收系统坐标系所对应的单位旋转矩阵和平移向量。这里我们把投影仪看做是一个逆向的相机,将其简化为和相机一样的模型,由小孔成像模型分别计算出该点在投影仪中数字微镜器件(DMD)和接收系统的 CCD 上对应的像素坐标:

$$[u_1, v_1, 1]^T = K_1 \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[u_2, v_2, 1]^T = K_2 \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,  $K_1$ 、 $K_2$  是相机的内参。由于投影云纹的相位实质上是两个光栅相位之差,由此可以推导出参考平面上任意一点  $(X, Y, Z)$  的相位:

$$\varphi_{1(X, Y, Z)} = \frac{2\pi u_1}{p_1} - \frac{2\pi u_2}{p_2} \quad (5)$$

其中,  $p_1$ 、 $p_2$  是以像素为单位的光栅栅距。将待测试件放在参考平面以后,原来的点变为  $(X, Y, Z + h_{(X, Y)})$ , 类似的计算过程可以得到该点的相位:

$$[X'_1, Y'_1, Z'_1]^T = R_1^T[X, Y, Z + h_{(X, Y)}]^T - T_1 \quad (6)$$

$$[X'_2, Y'_2, Z'_2]^T = R_2^T[X, Y, Z + h_{(X, Y)}]^T - T_2 \quad (7)$$

$$[u'_1, v'_1, 1]^T = K_1 \begin{bmatrix} X'_1 \\ Y'_1 \\ Z'_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[u'_2, v'_2, 1]^T = K_2 \left[ \frac{X'_2}{Z'_2}, \frac{Y'_2}{Z'_2}, 1 \right]^T \tag{9}$$

$$\varphi_{2(X,Y,Z+h_{(X,Y)})} = \frac{2\pi u'_1}{p_1} - \frac{2\pi u'_2}{p_2} \tag{10}$$

这个相位和之前参考平面上的点的相位明显是不一样的，它们的差值是由试件表面对栅线调制使得栅线变形而导致的：

$$\Delta\varphi_{(X,Y,Z,h_{(X,Y)})} = \varphi_{2(X,Y,Z,h_{(X,Y)})} - \varphi_{1(X,Y,Z)} = \frac{2\pi(u'_1 - u_1)}{p_1} - \frac{2\pi(u'_2 - u_2)}{p_2} \tag{11}$$

将上面推导的所有公式代入式(12)：

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{(X,Y,Z,h_{(X,Y)})} = & \frac{2\pi K_{111}}{p_1} \left[ \frac{R_{11}[X,Y,Z+h_{(X,Y)}]^T - T_{11}}{R_{13}[X,Y,Z+h_{(X,Y)}]^T - T_{13}} - \frac{R_{11}[X,Y,Z]^T - T_{11}}{R_{13}[X,Y,Z]^T - T_{13}} \right] \\ & + \frac{2\pi K_{112}}{p_1} \left[ \frac{R_{12}[X,Y,Z+h_{(X,Y)}]^T - T_{12}}{R_{13}[X,Y,Z+h_{(X,Y)}]^T - T_{13}} - \frac{R_{12}[X,Y,Z]^T - T_{12}}{R_{13}[X,Y,Z]^T - T_{13}} \right] \\ & - \frac{2\pi K_{211}}{p_2} \left[ \frac{R_{21}[X,Y,Z+h_{(X,Y)}]^T - T_{21}}{R_{23}[X,Y,Z+h_{(X,Y)}]^T - T_{23}} - \frac{R_{21}[X,Y,Z]^T - T_{21}}{R_{23}[X,Y,Z]^T - T_{23}} \right] \\ & - \frac{2\pi K_{212}}{p_2} \left[ \frac{R_{22}[X,Y,Z+h_{(X,Y)}]^T - T_{22}}{R_{23}[X,Y,Z+h_{(X,Y)}]^T - T_{23}} - \frac{R_{22}[X,Y,Z]^T - T_{22}}{R_{23}[X,Y,Z]^T - T_{23}} \right] \end{aligned} \tag{12}$$

其中， $K_{ijk}(i,j,k=1,2)$ 是内参矩阵  $K_i$  的第  $j$  行、第  $k$  列元素； $R_{ij}(i=1,2; j=1,2,3)$ 是旋转矩阵  $R_i$  的第  $j$  行横向量； $T_{ij}(i=1,2; j=1,2,3)$ 是列向量  $T_i$  的第  $j$  行元素。一般以参考平面作为  $Z=0$  的平面，即式(12)中所有  $Z$  都可以忽略。等式左边的相位差可以通过两次相移计算得到的云纹相位作差得到，右式中除了需要标定的系统参数外只有一个未知量  $h_{(X,Y)}$ ，并且它同时出现在分子和分母上，这就必然导致相位差和高度变化的关系是非线性的。由这个等式反解出  $h_{(X,Y)}$  比较困难，因此，为了计算出高度场信息我们提出一个简单的迭代算法。

在获得参考平面的相位场  $\varphi_{ref}(u_2, v_2)$  和待测试件的相位场  $\varphi_{obj}(u'_2, v'_2)$  后，先通过建立的模型和系统参数算出  $h_0$  处平面（一般  $h_0$  取被测试件的大致高度）与参考平面的相位差，用  $h_0$  除以相位差即可得到这段位移的平均灵敏度系数，然后用实验获得的相位差乘以这个系数获得一个初始值以开始迭代，如公式(13)、(14)。有了初始值以后，依据新的高度场计算这个新高度场中每个点的平均灵敏度系数，用新高度计算新的像素坐标并插值得到一幅新的待测试件的相位图  $\varphi_{obj}(u''_2, v''_2)$ ，如公式(15)~(18)。

$$k_0 = \frac{h_0}{\varphi_{2(X,Y,Z,h_0)} \Big|_{Z=0} - \varphi_{1(X,Y,Z)} \Big|_{Z=0}} \tag{13}$$

$$h_1 = k_0 \times (\varphi_{obj}(u'_2, v'_2) - \varphi_{ref}(u_2, v_2)) \tag{14}$$

$$k_n = \frac{h_n}{\varphi_{2(X,Y,Z,h_n)} \Big|_{Z=0} - \varphi_{1(X,Y,Z)} \Big|_{Z=0}} \tag{15}$$

$$[X'_2, Y'_2, Z'_2]^T = R_2^T [X, Y, Z + h_n]^T - T_2 \tag{16}$$

$$[u'_2, v'_2, 1]^T = K_2 \left[ \frac{X'_2}{Z'_2}, \frac{Y'_2}{Z'_2}, 1 \right]^T \tag{17}$$

$$h_{n+1} = k_n \times (\varphi_{obj}(u''_2, v''_2) - \varphi_{ref}(u_2, v_2)) \tag{18}$$

## 2 系统参数标定

### 2.1 接收系统标定

相机的标定方法已经十分成熟，本文用到的是张正友标定法<sup>[23]</sup>，即用相机拍摄不同位置、不同角度下的标定板，根据标定板的格点的像素坐标和格点的实际尺寸计算出相机的内参和外参。

接收系统包含两个成像过程，第一个镜头 L2 将投影仪投影到参考面的栅线成像到光栅 G2 上，然后 CCD 再将光栅上形成的云纹拍下来转化成数字信息。这里我们简化了模型，将接收系统看做一个整体，换言之我们认为 CCD 所拍到的云纹图像是对云纹的简单线性放大。标定的参数是  $R_2$ 、 $T_2$ 、 $K_2$ ，它们所描述的是从参考平面到 CCD 采到的图像间的变换关系。图 2 是一组实验中对接收系统标定时所

拍摄的大标定板的照片(为了展示方便,对每张原始图片做了裁切),标定板上每个方格子的边长均为15mm。

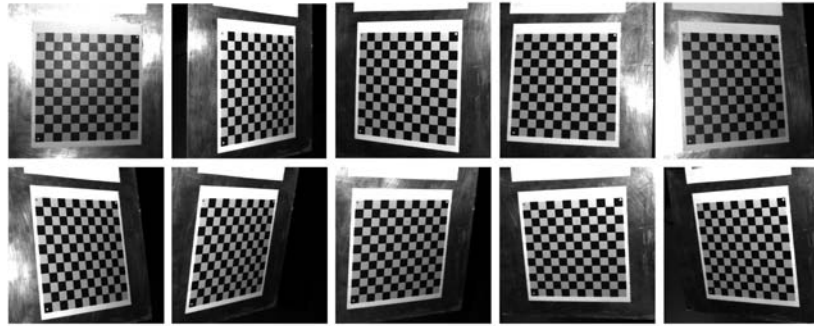


图2 不同位置角度下标定板照片

Fig. 2 Pictures of the calibration board under different orientations

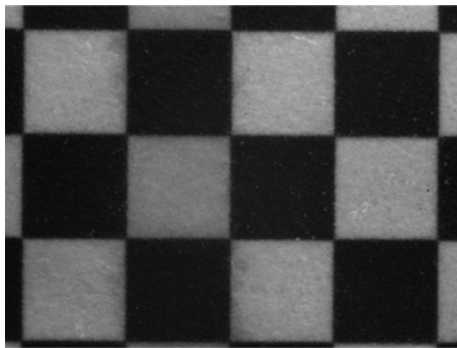


图3 小标定板图像

Fig. 3 Image of the small calibration board

为了确定接收系统的光栅栅距  $p_2$ , 需要知道 CCD 拍摄的比例系数  $c$ , 即 1mm 对应多少像素, 这样便能根据光栅实际栅距算出等效栅距  $p_2 = p_{G2} \times c$ 。实验中只需要用小标定板替换放在高精度驱动器上的标准栅 G2 即可, 然后由 CCD 拍下小标定板的照片, 即可算出比例系数  $c$ 。如图 3 所示, 小标定板上每个格子的边长为 2.5mm, 找到小标定板图像上的格点计算得到  $c = 148.54 \text{ pixel/mm}$ , 我们使用的光栅为 40 线/mm, 因此  $p_2 = 1 \text{ mm} \div 40 \times 148.54 \text{ pixel/mm} = 3.713 \text{ pixel}$ 。

## 2.2 投影系统标定

投影仪本身不能拍照, 只能投影图像到参考平面或者待测物体表面, 不过可以将投影仪看成一个逆向的相机, 只要找到一个方法可以确定标定板格点在投影仪所投影的图像中的像素坐标, 即可将投影仪标定转化为另一个相机标定。这里我们借鉴了投影条纹系统中投影仪的标定方法<sup>[25]</sup>, 找到投影仪像素坐标和相机像素坐标的关系。

以某一个位置为例, 如图 4 所示。首先拍下标定板的图像, 即图 4(a), 接着投影一个画有十字形线条的图片, 所采到的图即为图 4(b), 这个十字的交叉点在投影仪中的像素坐标为  $(u_{\text{cross\_proj}}, v_{\text{cross\_proj}}) = (960, 600)$ , 再找出 CCD 所采集的图像(图 4(b))中交叉点的像素坐标  $(u_{\text{cross\_cam}}, v_{\text{cross\_cam}})$ , 后面的计算将建立在这个基准点的基础之上。然后分别投影周期为  $p_{\text{horizontal}} = p_{\text{vertical}} = 16 \text{ pixel}$  的横条纹和竖条纹图像到标定板上即图 4(c)和(d), 通过四步相移计算出全场的相位, 分别记作  $\varphi_{\text{horizontal}}$  和  $\varphi_{\text{vertical}}$ , 对应图 4(e)和(f)。这样, 由每一个像素点和基准点之间的横纵条纹相位差, 可以算出该像素点在投影仪中的像素坐标, 具体计算公式如下:

$$u_{\text{proj}} = u_{\text{proj\_cross}} - \frac{p_{\text{vertical}}}{2\pi} (\varphi_{\text{vertical}}(u_{\text{cam}}, v_{\text{cam}}) - \varphi_{\text{vertical}}(u_{\text{cam\_cross}}, v_{\text{cam\_cross}})) \quad (19)$$

$$v_{\text{proj}} = v_{\text{proj\_cross}} - \frac{p_{\text{horizontal}}}{2\pi} (\varphi_{\text{horizontal}}(u_{\text{cam}}, v_{\text{cam}}) - \varphi_{\text{horizontal}}(u_{\text{cam\_cross}}, v_{\text{cam\_cross}})) \quad (20)$$

其中,  $(u_{\text{cam}}, v_{\text{cam}})$  是 CCD 所采到的图像中任意点的像素坐标;  $(u_{\text{proj}}, v_{\text{proj}})$  是该点在投影仪所投影的图像中所对应的像素点坐标。通过这两个公式的计算, 我们可以找到每一个标定板格点在投影仪中所对应的像素坐标。对这些标定板格点在投影仪中对应的点阵, 再次使用张正友标定法即可标定出投影仪的内参和外参。图 5 所展示的即为一组匹配的标定板格点和其在投影仪中所对应的点阵。

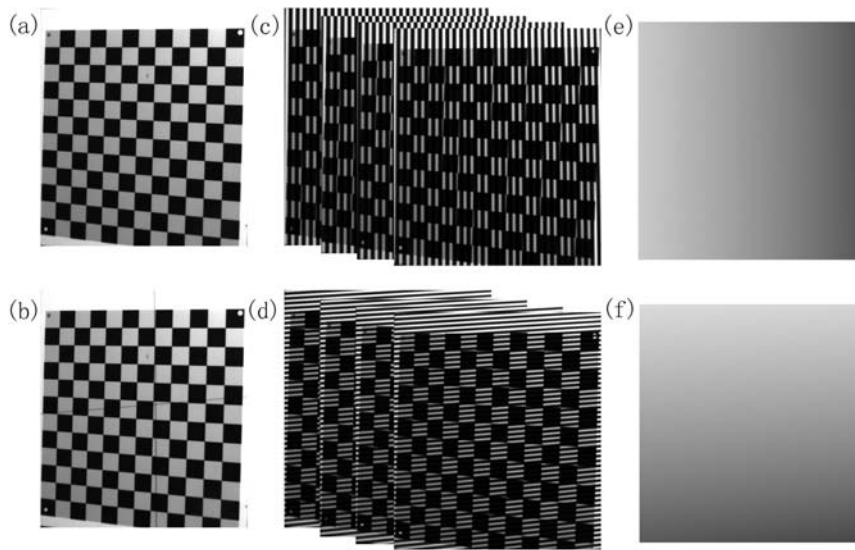


图 4 (a)某个位置下标定板图像;(b)投影十字线条到标定板后的图像;(c) 竖条纹相移图像;  
(d)横条纹相移图像;(e)投影竖条纹时的标定板相位;(f)投影横条纹时的标定板相位

Fig. 4 (a) Pictures of the calibration board; (b) pictures of the calibration board when cross-line is projected;  
(c) phase-shifted patterns with vertical fringes; (d) phase-shifted patterns with horizontal fringes; (e) phase of the calibration board when projecting vertical fringes; (f) phase of the calibration board when projecting horizontal fringes



图 5 某个位置下标定板格点在(a)CCD所采集图像中和(b)投影仪中所对应的点阵

Fig. 5 Dot matrix of the intersection points on the calibration board in (a) the image captured by CCD,  
and their corresponding points on (b) the DMD of the projector

### 3 实验和误差分析

#### 3.1 三维形貌测量实验

实验装置如图 6 所示,左上方为投影仪,左下方为接收系统,包括最前方的广角镜头、连接着控制器的 PZT、安装在 PZT 上的标准光栅、短焦镜头以及连接着电脑的 CCD。实验中用到的光栅为 40 线/mm,投影仪分辨率为  $1920 \times 1200$ ,做云纹实验时投影两像素黑线两像素白线的黑白相间的条纹图,做标定实验时投影 16 个像素为一周期的灰度从 0 到 255 呈正弦变化的数字正弦栅。

先后做了两个形貌测量实验以验证本文方法的可行性和正确性:第一个实验测量的是将参考平面向前平移 10mm 后的平面,第二个实验测量了一



图 6 实验测量系统

Fig. 6 Measuring system in experiment

个 1:1 的人类牙齿模型的三维形貌。实验中用同步移动两个光栅(对投影系统而言“移动光栅”是靠更换投影的图片来实现的)并平均所得的云纹图像的方法去除了高频栅线<sup>[4]</sup>,这样算得的相位图更平滑、准确。平移 10mm 后的参考平面的测量结果如图 7 所示,(a)是实验中采到的云纹图像,(b)是测量结果的三维展示,(c)是图(a)中虚线上所有点的高度曲线。实验测量的牙齿模型的云纹图像如图 8(a)所示,计算出的三维形貌如图 8(b)所示。值得注意的是,因解相位过程中无法识别相位的阶跃,因此云纹法不能测量沿接收系统光轴方向有较大台阶式突变的物体,对于简单的台阶状物体,可以将其倾斜再做测量。第一个实验中测量的平移后的参考平面是在平移过程中观察某一定点云纹移动方向和云纹移动级数来确定整个待测平面的云纹相位。对于一般的没有较大突变的被测物体,选取参考平面上某一定点为基准点(一般选择放置台的边缘),放置被测物时需注意被测物表面一定要经过该定点。表 1 列出了实验中标定好的投影云纹测量系统的系统参数。

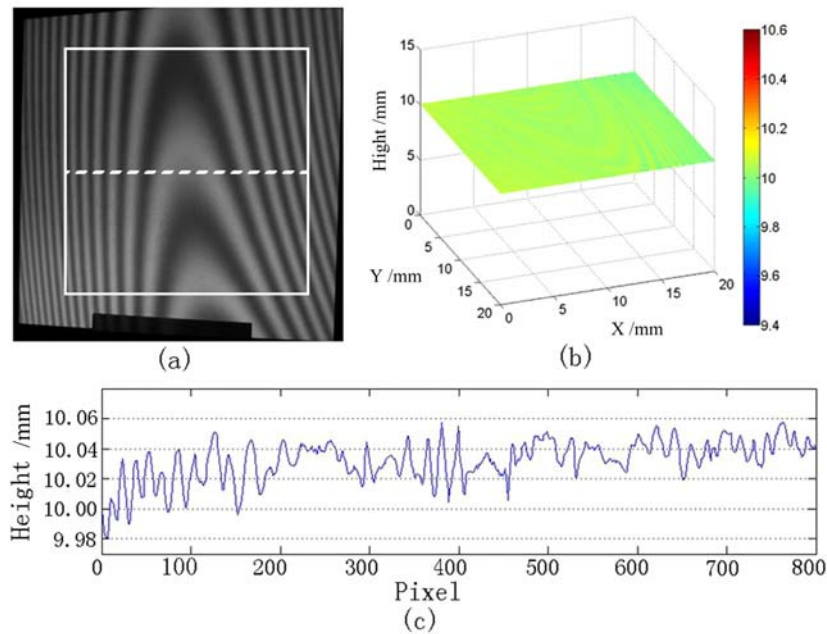


图 7 平移 10mm 后的参考平面测量结果:(a)云纹图像,(b)图(a)中白色方框区域内的三维形貌展示,(c)图(a)中白色虚线上所有点的高度曲线

Fig. 7 Measurement results of the reference plane after been translated 10mm: (a) moiré pattern of the plane, (b) reconstructed 3D shape limited within the white square in picture (a), (c) height data on the white dotted line

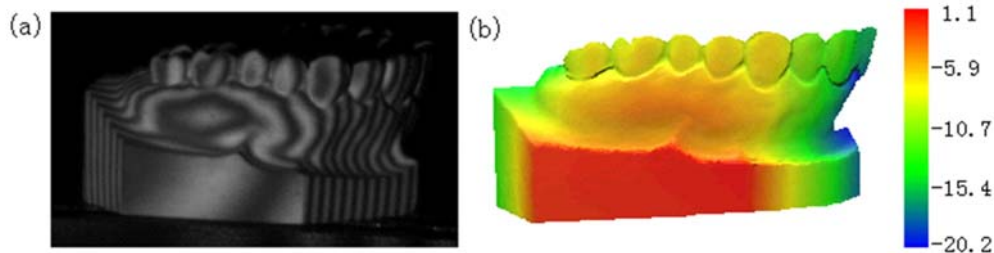


图 8 牙齿模型形貌测量:(a)1:1 牙齿模型的云纹图像,(b)测量出的牙齿三维形貌

Fig. 8 3D shape measurement of teeth: (a) the moiré pattern of the 1:1 model of teeth; (b) reconstructed 3D shape of teeth

为了更直观地感受我们所提出的方法与现有方法的区别和优势,表 2 列出了几种不同方法的比较。事实上,只有本文提出的方法对光路不作任何要求,其余大多需要一个高精度的平动台来实现标定,有些甚至要求投影系统、接收系统垂直于参考平面。参考文献[19]与本文所使用的方法均对光路不作要求、且都能达到很高的精度,但是这两者计算方法和标定方法都截然不同,本文的标定方法更加简单、易

于操作,不需要借助平动台重复平移参考平面并测量其该位置下的相位场,更易于被推广到实际应用中。

表 1 一组标定好的投影云纹测量系统的系统参数

Tab. 1 A set of system parameters of an arbitrarily arranged projection moiré system

系统参数	投影系统	接收系统
旋转矩阵	$R_1 = \begin{bmatrix} -0.0159 & 0.9848 & -0.1729 \\ 0.9912 & 0.0383 & 0.1268 \\ 0.1315 & -0.1694 & -0.9767 \end{bmatrix}$	$R_2 = \begin{bmatrix} -0.0109 & 0.9838 & 0.1792 \\ 0.9997 & 0.0146 & -0.0192 \\ -0.0215 & 0.1789 & -0.9836 \end{bmatrix}$
平移向量	$T_1 = \begin{bmatrix} -81.7 \\ -68.2 \\ 806.2 \end{bmatrix}$	$T_2 = \begin{bmatrix} -22.5 \\ -23.1 \\ 627.1 \end{bmatrix}$
内参	$K_1 = \begin{bmatrix} 3162.5 & 0 & 1026.3 \\ 0 & 3178.2 & 610.3 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$K_2 = \begin{bmatrix} 2516.9 & 0 & 618.6 \\ 0 & 2530.7 & 473.8 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
光栅栅距(像素)	$p_1 = 4$	$p_2 = p \times c = 3.713$

表 2 不同测量方法的比较

Tab. 2 Comparison of different methods of measurement

	1. 本文方法	2. 参考文献[6]中的方法	3. 参考文献[18]中的方法	4. 参考文献[19]中的方法
光路要求	无要求	投影系统接收系统均垂直于参考平面	投影系统垂直于参考面	无要求
标定方法	标准化的相机标定和投影仪标定	沿 Z 轴平移参考平面测量其不同位置处的相位,拟合高度和相位的关系	沿 Z 轴平移参考平面测量其不同位置处的相位,拟合高度和相位的关系	标准化的相机标定;沿 Z 轴平移参考平面测量其不同位置处的相位,拟合坐标和相位的关系
测量区域	可大可小,由投影仪所能清晰投影的视场面积决定	小	小	可大可小,但光栅的投影质量限制其测量面积不超过 1m <sup>2</sup>
测量结果	20cm×20cm 平板在 Z=10mm 处测量结果的 Z 坐标平均值为 10.03mm, RMS=8μm	底边边长 36mm 高 18mm 的金字塔,最大测量误差为 3%	对 2mm 厚的物块测量三次,测量误差分别为 2.45%、3.2%、3.31%	未移动的参考平面的测量结果中某一行 RMS=6.7μm,这一行的最大测量误差为 20μm
优缺点	便捷,精度高,可操作性强	测量面积小,光路的要求高,标定过程需使用平动台,限制其应用	精度低,测量面积小,标定过程离不开平动台,难以广泛应用	标定过程须在控制台上进行,限制其应用,且每一个状态采图量很大,较为繁琐

### 3.2 误差分析

经分析,实验误差主要来源于以下几个方面:光栅的非正弦性产生的误差, PZT 控制光栅平动时的控制误差,相机标定和投影仪标定的误差,以及模型近似导致的对灵敏度系数的计算误差。前两个误差会导致相位求解时带来与云纹图像的周期相一致的纹波,但是通过同步移动光栅并平均图像的方法可以消除大部分纹波。相机和投影仪的标定误差体现在像素误差上,事实上用十张不同角度下标定板的图像所提取出的格点计算出的参数去反算格点坐标,误差均在 0.1~0.2 个像素的范围内。最后一个误差来源于计算方法中所做的近似,即假设光栅 G2 所在平面严格垂直于接收系统的光轴,这样计算时才

能认为转换成像素坐标后光栅栅距是一个恒定值。但是在实际实验中,光栅与接收系统光轴是否垂直、朝哪个方向偏转、每个方向分别偏转了多少角度并无法测量出来,为此我们用 matlab 做了模拟实验来量化光栅放置的偏角对整个云纹实验的计算结果的影响。

模拟实验中的系统参数也采用了表 1 所列的参数。为了模拟光栅偏转,我们以光栅中心为定点,以垂直于光轴的位置为起始位置,先后绕平行于栅线方向、垂直于栅线方向和垂直于整块光栅的方向旋转一定角度。原本我们做的模拟应在计算相位时用正确的图像除以因为偏转而产生微小变化的栅距。事实上,直接计算光栅的偏转所引起的栅距在不同位置处的微小变化十分复杂,因为这个微小偏转导致的栅距变化非常小。在模拟实验中我们将其转换为另一个等价的易于计算问题。考虑到光栅偏转的直接结果就是光栅与 CCD 拍摄平面会产生微小的夹角,如果将图像和光栅同时逆向偏转使光栅平面垂直于光轴,那么相对应的原来的图像就会有微小偏转。因此可以模拟拍摄平面的偏转,即对原来标定结果计算出的正确图像做旋转变换,再除以光栅平面与光轴垂直时的恒定栅距来计算相位。当旋转角度均为  $0.5^\circ$  时,一个 10mm 的平板的模拟测量结果如图 9(a)所示,测量误差最大处误差为  $0.24\%$ ;当每个方向的旋转角都为  $1^\circ$  时,模拟结果如图 9(b)所示,测量误差最大处误差约为  $0.5\%$ 。由此可见,光栅的微小偏转所引起的栅距微小变化对于三维形貌的计算影响并不大,将其忽略是完全合理的。上文中对一个平移后的参考平面的测量结果反映出整个系统误差控制在  $1\%$  以下,是若干种误差的综合效应,即系统误差小于  $1\%$ ,间接证明了忽略光栅的微小偏转是完全可行的。

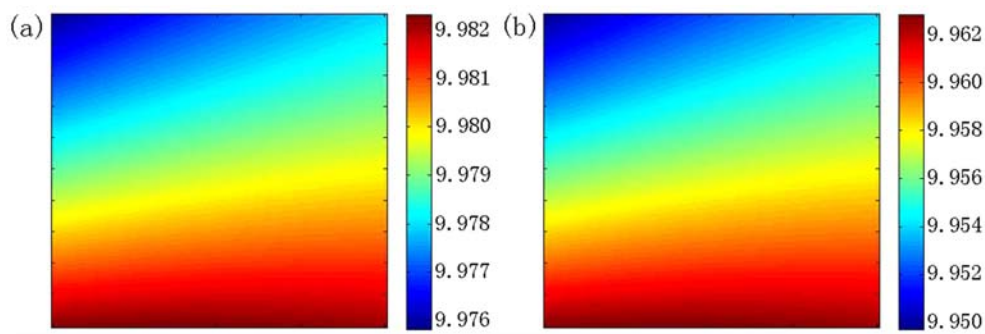


图 9 模拟实验测量 10mm 平板结果图:(a)光栅绕三个方向分别旋转  $0.5^\circ$ ;(b)光栅绕三个方向分别旋转  $1^\circ$

Fig. 9 Simulation result of a 10mm board: (a) the reference grating rotates  $0.5^\circ$  around three axes respectively; (b) the reference grating rotates  $1^\circ$  around three axes respectively

## 4 结 论

本文提出了一套完整的用投影云纹法测量物体三维形貌的方法,建立了投影云纹系统的理论模型,推导了云纹相位和坐标的关系,提出一种迭代算法用以计算被测物体高度,并提供了一种适用于用投影仪投影栅线的投影云纹系统的系统参数标定方法。这种方法不再对实验光路有特殊的要求,是其能够获得广泛应用的前提。经测量实验验证,本文提出的投影云纹三维形貌测量系统的计算和标定方法简单易行、精度高,标定过程对实验设备的要求很低,仅需一大一小两块平整的标定板即可实现对整个系统的标定。最后,我们对实验的误差来源进行了分析,并对其中可能产生较大影响的光栅偏转做了数值模拟实验以量化其对测量的影响,结果表明光栅微小偏转对测量的影响不大,将其忽略是可行的。

### 参考文献:

- [ 1 ] Meadows D M, Johnson W O, Allen J B. Eeneration 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 ] Choi Y B, Kim S W. Phase-shifting grating projection moiré topography[J]. Optical Engineering, 1998, 37(3): 1005-1010.
- [ 4 ] Buytaert J A N, Dirckx J J J. Design considerations in projection phase-shift moiré topography based on theoretical



- analysis of fringe formation[J]. *Journal of the Optical Society of America a Optics Image Science & Vision*, 2007, 24(7):2003–2013.
- [5] Buytaert J A N, Direkx J J J. Moiré profilometry using liquid crystals for projection and demodulation[J]. *Optics Express*, 2008, 16(1):179–193.
- [6] Buytaert J A N, Direkx J J J. Phase-shifting moiré topography using optical demodulation on liquid crystal matrices[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2010, 48(2):172–181.
- [7] Fleming G A, Bartram S M, Waszak M R, et al. Projection moiré interferometry measurements of micro air vehicle wings[J]. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, 2001, 4448:90–101.
- [8] Direkx J 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.
- [9] Laulund T, Søjbjerg J O, Hørlyck E. Moiré topography in school screening for structural scoliosis[J]. *Acta Orthopaedica*, 1982, 53(5):765–768.
- [10] 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 displacement and model changes of a stiffened plate[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1986, 1(4):94–97 (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] 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))
- [13] 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):47–63.
- [14] Tang Y, Yao J, Chen J. Novel method for increasing accuracy of projection moiré contouring of large surfaces[J]. *Optics Express*, 2016, 24(18):21190–21204.
- [15] Breque C, Dupre J C, Bremand F. Calibration of a system of projection moiré for relief measuring: biomechanical applications[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2004, 41(2):241–260.
- [16] Sciammarella C A, Sciammarella F M. High-accuracy contouring using projection moiré[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(9):093605.
- [17] Yao J, Tang Y, Chen J. Three-dimensional shape measurement with an arbitrarily arranged projection moiré system[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(4):717–720.
- [18] Chen L, Cho C, Nguyen X. One-shot three-dimensional surface profilometry using DMD-based two-frequency moiré and fourier transform technique[J]. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent System*, 2009, 2(3):345–380.
- [19] 姚骏, 唐颖, 陈巨兵. 基于任意系统位置关系的投影云纹形貌测量技术研究[J]. *实验力学*, 2017, 32(1):27–34 (YAO Jun, TANG Ying, CHEN Jubing. On the measurement technique of projection moiré topography based on the arbitrarily arranged system position relation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(1):27–34 (in Chinese))
- [20] Tsai R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE Journal on Robotics & Automation*, 2003, 3(4):323–344.
- [21] Caprile B, Torre V. Using vanishing points for camera calibration[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1990, 4(2):127–139.
- [22] Shah S, Aggarwal J K. Intrinsic parameter calibration procedure for a (high-distortion) fish-eye lens camera with distortion model and accuracy estimation[J]. *Pattern Recognition*, 1996, 29(11):1775–1788.
- [23] Zhang Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]. *The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. IEEE, 1999:666–673.
- [24] Legardasáenz R, Bothe T, Jüptner W P O. Accurate procedure for the calibration of a structured light system[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(2):464–471.

- [25] Zhang S, Huang P S. Novel method for structured light system calibration[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(8):083601.
- [26] Chen X, Xi J, Jin Y, et al. Accurate calibration for a camera-projector measurement system based on structured light projection[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2009, 47(3-4):310—319.

## A 3-D profile measurement technique and its calibration method based on projected moiré method

TANG Ying, YAO Jun, CHEN Ju-bing

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

**Abstract:** Projected moiré method used for 3-D object profile measurement has the advantages of non-contact, rapid and full field measurement, and the resolution and accuracy of calculated results are very high. In this paper, new computing and calibrating methods for 3-D profile measurement by projected moiré system are proposed. This method is suitable for a projected moiré system which is directly projecting grid line by projector and has no special relative position requirement for optical paths. The calibration process has only low requirements of equipment and is easy to operate. The calibration of whole system can be realized by using two flat calibration plates; one is large, the other one is small. Its feasibility, correctness and high accuracy are verified by real object measurement.

**Keywords:** projected moiré; surface topography; sensitivity coefficient; system calibration