

# 说明书

---

## 一种基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正方法及其系统

### 技术领域

本发明涉及光学三维测量领域，尤其涉及一种基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正方法及其系统。

### 背景技术

条纹投影轮廓术，作为光学三维测量技术的分支，由于具有非接触性、全场性、快速性、高分辨率等特点，使其在工业制造、医学诊断、文化遗产、影视娱乐等领域得到了日益广泛的应用。它的工作原理是：利用投影仪向待测物体表面投射一系列的载频条纹图（如通常为正弦条纹图），待测物体的深度信息会对条纹图调制而使之发生变形，然后利用条纹分析技术对相机采集的变形条纹图进行相位解调即可获得包含待测物体深度信息的相位图，最后根据标定好的相位深度映射关系即可由相位图求得待测物体的深度分布，实现对待测物体表面形貌的三维测量。

然而，由于待测物体的三维形貌是根据相位计算获得，相位图的质量是决定三维测量结果精度的关键因素之一。而在实际测量系统中，由于制造和装配误差，投影仪和相机的镜头畸变误差是不可避免。在这种情况下，投影仪的镜头畸变将会使得投射的正弦条纹图变形——即在垂直于投影仪光轴的平面上会得到变周期的条纹图。与定周期的条纹图（如正弦条纹图）相比较，如果将这种条纹图投射到待测物体表面，解调的相位中将会引入由于投影仪的镜头畸变引起的变形相位，导致最后的三维测量结果产生误差。

目前，针对投影仪的镜头畸变带来测量误差，现有方法大多先标定投影仪，然后根据标定的镜头畸变系数修改待投影的条纹图，使经过投影仪投射后的条纹图分布是标准的正弦条纹。然而，由于投影仪不能直接采集图像，精确地标

定投影仪仍然存在一定难度。此外，现有标定方法通常假定投影平面的重投影误差满足正态分布，采用极大似然估计法标定投影仪的内外部参数，然而，由于相机像面与投影平面之间映射关系是非线性，在投影平面上无法获得具有统计特性的重投影误差，在这种情况下，采用极大似然估计法标定投影仪的内外部参数存在一定的误差。

因此，如何实现高精度、易操作的投影仪镜头畸变校正成为条纹投影轮廓术中的一项技术难题，亟待解决。

## 发明内容

有鉴于此，本发明的目的在于提供一种基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正方法及其系统，旨在解决现有技术中投影仪镜头畸变校正的精度较低且不易操作的问题。

本发明提出一种基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正方法，主要包括：

步骤一、利用条纹投影测量系统获取标准平板的绝对相位；

步骤二、根据所述绝对相位，计算由于投影仪的镜头畸变引起的相位误差；

步骤三、定义垂直于投影仪镜头光轴的一平面  $G$ ，根据所述相位误差计算平面  $G$  与投影平面的映射关系；

步骤四、根据所述映射关系，生成变频、相移自适应条纹用于投影，使得投影仪投出的条纹在平面  $G$  上为标准的正弦条纹。

另一方面，本发明还提供一种基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正系统，所述系统包括：

相位获取模块，用于利用条纹投影测量系统获取标准平板的绝对相位；

误差计算模块，用于根据所述绝对相位，计算由于投影仪的镜头畸变引起的相位误差；

映射计算模块，用于定义垂直于投影仪镜头光轴的一平面  $G$ ，根据所述相位误差计算平面  $G$  与投影平面的映射关系；

条纹生成模块，用于根据所述映射关系，生成变频、相移自适应条纹用于投影，使得投影仪投出的条纹在平面 G 上为标准的正弦条纹。

本发明提供的技术方案与现有技术相比，其显著优点包括：（1）本发明无需直接标定投影仪，避免了标定误差对测量结果的影响，能够改善测量精度，降低了计算复杂度；（2）本发明无需多次改变平板的空间方位和姿态，只需将标准平板任意摆放在测量空间范围内一次，即可生成自适应条纹用于投影，能够缩短前期准备的时间；（3）本发明无需计算测量系统的参数，如投影仪和相机光轴之间的夹角等，能够适用于任意设置的条纹投射测量系统。

## 附图说明

图 1 为本发明一实施方式中基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正方法流程图；

图 2 为本发明一实施方式中基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正系统 10 的内部结构示意图；

图 3 为本发明一实施方式中利用自适应条纹测量标准平板的结果示意图；

图 4 为本发明一实施方式中利用自适应条纹测量标准球的测量结果示意图；

图 5 为本发明一实施方式中投影仪和相机标定的重投影误差分布示意图；

图 6 为本发明一实施方式中利用相位辅助法标定投影仪后对陶瓷平面的测量结果示意图。

## 具体实施方式

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

本发明采用如下技术方案：首先利用条纹投射测量系统测量标准平板（例

如平面度小于 0.01mm) 的绝对相位; 其次根据测量的绝对相位, 计算由投影仪的镜头畸变引起的相位误差; 接着定义垂直于投影仪镜头光轴的某一平面 G, 根据相位误差建立平面 G 与投影平面之间的映射关系; 最后利用所建立的映射关系, 生成自适应条纹用于投影, 即可抵消投影仪镜头畸变对条纹图的影响, 在平面 G 上获得标准的正弦条纹。这种方法无需标定投影仪和测量系统参数, 如投影仪的镜头畸变系数、投影仪和相机光轴之间的夹角等, 能够降低计算复杂度、改善测量结果的精度, 适用于任意设置的条纹投射测量系统。

以下将对本发明所提供的一种基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正方法进行详细说明。

请参阅图 1, 为本发明一实施方式中基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正方法流程图。

在步骤 S1 中, 步骤一、利用条纹投影测量系统获取标准平板的绝对相位。

在本实施方式中, 所述步骤一具体包括:

利用投影仪向标准平板分别投射一套竖直和水平的变频、相移正弦条纹图, 然后采用条纹分析技术分析相机记录的正弦条纹图, 并获得标准平板的绝对相位  $(\Phi_{m,h}, \Phi_{m,v})$ 。

在本实施方式中, 将标准平板任意放置在条纹投射系统的测量空间内, 利用投影仪向平板分别投射一套变频、相移的水平和竖直正弦条纹图。假设利用相机记录的第 k 帧条纹图强度  $I_c^k$  可表示为  $I_c^k(i, j) = I'(i, j) + I''(i, j) \cos(\Phi(i, j) + \delta_k)$ , 其中,  $I'(i, j)$  表示平均强度,  $I''(i, j)$  表示调制度,  $\Phi(i, j)$  表示待求的相位,  $\delta_k = 2\pi N/k$  表示相邻两帧条纹图之间的相移量, N 表示相移次数。根据相移算法, 包裹相位  $\Phi_w$  可由下式计算求得:

$$\Phi_w(i, j) = \tan^{-1} \left( \frac{\sum_{k=1}^N I_c^k(i, j) \sin \delta_k}{\sum_{k=1}^N I_c^k(i, j) \cos \delta_k} \right);$$

其中，利用相位解包裹算法对  $\Phi_w$  展开，可获得待测平板的两个绝对相位  $\Phi_{m,h}$  和  $\Phi_{m,v}$ 。

在步骤 S2 中，步骤二、根据所述绝对相位，计算由于投影仪的镜头畸变引起的相位误差。

在本实施方式中，所述步骤二具体包括：

利用公式  $\Phi_c(i, j) = \frac{r + si + tj}{1 + ui + vj}$ ，拟合测量的绝对相位获得载波相位分布，其中， $\Phi_c(i, j)$  表示在像素点  $(i, j)$  处拟合的载波相位， $r, s, t, u, v$  表示与系统参数相关的系数；

然后将测量的绝对相位  $(\Phi_{m,h}, \Phi_{m,v})$  减去拟合的载波相位  $\Phi_c(i, j)$ ，即可获得由于投影仪的镜头畸变引起的相位误差  $(\Delta\Phi_{a,h}, \Delta\Phi_{a,v})$ 。

在本实施方式中，假设忽略投影仪和相机的镜头畸变影响，则平板的绝对相位可用如下公式表示  $\Phi_c(i, j) = \frac{r + si + tj}{1 + ui + vj}$ ， $\Phi_c(i, j)$  表示在像素点  $(i, j)$  处拟合的载波相位， $r, s, t, u, v$  表示与系统参数相关的系数。然而，对于实际的条纹投射系统，投影仪和相机的镜头畸变对测量结果的影响不可忽略，标准平板绝对相位的测量结果包括三部分：由于条纹投射测量系统设置引起的载波相位，以及分别由投影仪和相机的镜头畸变误差引起的相位误差。由于相机标定方法非常成熟，且精度高。因此，根据相机标定结果对采集的条纹图预处理——即去畸变校正，即可消除相机镜头畸变对测量相位的影响。投影仪的镜头畸变量通常都很小，很难直接通过肉眼观察发现投射的条纹图变形。在这种情

况下，利用公式  $\Phi_c(i, j) = \frac{r + si + tj}{1 + ui + vj}$ ，拟合测量的绝对相位，可获得载波相位分布。最后将测量的绝对相位减去拟合的载波相位，可获得由于投影仪的镜头畸变引起的相位误差  $\Delta\Phi_a$ ，其中， $\Delta\Phi_a = \Phi_m - \Phi_c$ 。显然，这样容易获得在投射水平和竖直相移条纹后，由于投影仪的镜头畸变引起的相位误差  $(\Delta\Phi_{a,h}, \Delta\Phi_{a,v})$ 。

在步骤 S3 中，步骤三、定义垂直于投影仪镜头光轴的一平面 G，根据所述相位误差计算平面 G 与投影平面的映射关系。

在本实施方式中，所述步骤三具体包括：

利用步骤一中测量的绝对相位  $(\Phi_{m,h}, \Phi_{m,v})$ ，建立投影平面与相机像面之间

等相位点对的映射关系为 
$$\begin{cases} s_1 = \frac{\Phi_{m,h}(i, j)}{2\pi p} \\ t_1 = \frac{\Phi_{m,v}(i, j)}{2\pi p} \end{cases}$$
，其中， $(s_1, t_1)$  为投影平面上的像素点，

$(s_1, t_1)$  像素点的相位与相机像面上的像素点  $(i, j)$  的相位相等；

根据步骤二中得到的相位误差  $(\Delta\Phi_{a,h}, \Delta\Phi_{a,v})$  建立三维数据点集  $(s_1, t_1, \Delta\Phi_{a,h}(i, j))$  和  $(s_1, t_1, \Delta\Phi_{a,v}(i, j))$ ；

利用泽尼克多项式 (Zernike Polynomials) 拟合上述两个三维数据点集  $(s_1, t_1, \Delta\Phi_{a,h}(i, j))$  和  $(s_1, t_1, \Delta\Phi_{a,v}(i, j))$ ，根据拟合的系数计算投影平面上整数像素点  $(s, t)$  的相位误差  $(\Delta\Phi_{a,h}(s, t), \Delta\Phi_{a,v}(s, t))$ ；

通过公式 
$$\begin{cases} s_2 = s + \frac{\Delta\Phi_{a,h}(s, t)}{2\pi p} \\ t_2 = t + \frac{\Delta\Phi_{a,v}(s, t)}{2\pi p} \end{cases}$$
 建立平面 G 和投影平面之间的映射关系，其中，

$(s_2, t_2)$  为平面 G 在投影平面上的映射点。

在步骤 S4 中，根据所述映射关系，生成变频、相移自适应条纹用于投影，使得投影仪投出的条纹在平面 G 上为标准的正弦条纹。

在本实施方式中，所述步骤四具体包括：

定义期望在平面 G 上获得的条纹图的相位分布；

根据步骤三中建立的映射关系以及平面 G 上的相位分布，计算投影平面上整数像素点的相位  $\Phi_p^A(s, t)$ ；

利用公式  $I_p^A(s, t) = \frac{I_{\max}}{2} (1 + \cos(\Phi_p^A(s, t)))$  生成自适应条纹图，其中， $I_p^A(s, t)$  表示自适应条纹图在像素点 (s, t) 处的强度， $I_{\max}$  表示自适应条纹图的最大强度。

本发明提供一种基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正方法，首先获取标准平板的绝对相位，然后利用绝对相位计算由于投影仪的镜头畸变引起的相位误差，接着定义垂直于投影仪光轴的某一平面 G，利用相位误差建立平面 G 与投影平面之间的映射关系，最后根据建立的映射关系，生成自适应条纹图用于投影，即可投影仪镜头畸变对条纹图的影响，在平面 G 上获得标准的正弦条纹图。这种方法无需标定投影仪和测量系统参数，如投影仪的镜头畸变系数、投影仪和相机光轴之间的夹角等，能够降低计算复杂度、改善测量结果的精度，适用于任意设置的条纹投射测量系统。

以下将对本发明所提供的一种基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正系统进行详细说明。

请参阅图 2，所示为本发明一实施方式中基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正系统 10 的结构示意图。

在本实施方式中，基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正系统 10，主要包括相位获取模块 11、误差计算模块 12、映射计算模块 13 以及条纹生成模块 14。

相位获取模块 11，用于利用条纹投影测量系统获取标准平板的绝对相位。

在本实施方式中，所述相位获取模块 11 具体用于：

利用投影仪向标准平板分别投射一套竖直和水平的变频、相移正弦条纹图，然后采用条纹分析技术分析相机记录的正弦条纹图，并获得标准平板的绝对相

位  $(\Phi_{m,h}, \Phi_{m,v})$ 。

在本实施方式中，将标准平板任意放置在条纹投射系统的测量空间内，利用投影仪向平板分别投射一套变频、相移的水平 and 竖直正弦条纹图。假设利用相机记录的第  $k$  帧条纹图强度  $I_c^k$  可表示为  $I_c^k(i, j) = I'(i, j) + I''(i, j) \cos(\Phi(i, j) + \delta_k)$ ，其中， $I'(i, j)$  表示平均强度， $I''(i, j)$  表示调制度， $\Phi(i, j)$  表示待求的相位， $\delta_k = 2\pi N/k$  表示相邻两帧条纹图之间的相移量， $N$  表示相移次数。根据相移算法，包裹相位  $\Phi_w$  可由下式计算求得：

$$\Phi_w(i, j) = \tan^{-1} \left( \frac{\sum_{k=1}^N I_c^k(i, j) \sin \delta_k}{\sum_{k=1}^N I_c^k(i, j) \cos \delta_k} \right);$$

其中，利用相位解包裹算法对  $\Phi_w$  展开，可获得待测平板的两个绝对相位  $\Phi_{m,h}$  和  $\Phi_{m,v}$ 。

误差计算模块 12，用于根据所述绝对相位，计算由于投影仪的镜头畸变引起的相位误差。

在本实施方式中，所述误差计算模块 12 具体用于：

利用公式  $\Phi_c(i, j) = \frac{r + si + tj}{1 + ui + vj}$ ，拟合测量的绝对相位获得载波相位分布

其中， $\Phi_c(i, j)$  表示在像素点  $(i, j)$  处拟合的载波相位， $r, s, t, u, v$  表示与系统参数相关的系数；

然后将测量的绝对相位  $(\Phi_{m,h}, \Phi_{m,v})$  减去拟合的载波相位  $\Phi_c(i, j)$ ，即可获得由于投影仪的镜头畸变引起的相位误差  $(\Delta\Phi_{a,h}, \Delta\Phi_{a,v})$ 。

在本实施方式中，假设忽略投影仪和相机的镜头畸变影响，则平板的绝对



相位可用如下公式表示  $\Phi_c(i, j) = \frac{r + si + tj}{1 + ui + vj}$ ,  $\Phi_c(i, j)$  表示在像素点  $(i, j)$

处拟合的载波相位,  $r, s, t, u, v$  表示与系统参数相关的系数。然而, 对于实际的条纹投射系统, 投影仪和相机的镜头畸变对测量结果的影响不可忽略, 标准平板绝对相位的测量结果包括三部分: 由于条纹投射测量系统设置引起的载波相位, 以及分别由投影仪和相机的镜头畸变误差引起的相位误差。由于相机标定方法非常成熟, 且精度高。因此, 根据相机标定结果对采集的条纹图预处理——即去畸变校正, 即可消除相机镜头畸变对测量相位的影响。投影仪的镜头畸变量通常都很小, 很难直接通过肉眼观察发现投射的条纹图变形。在这种情

况下, 利用公式  $\Phi_c(i, j) = \frac{r + si + tj}{1 + ui + vj}$ , 拟合测量的绝对相位, 可获得载波相位分布。最后将测量的绝对相位减去拟合的载波相位, 可获得由于投影仪的镜头畸变引起的相位误差  $\Delta\Phi_a$ , 其中,  $\Delta\Phi_a = \Phi_m - \Phi_c$ 。显然, 这样容易获得在投射水平和竖直相移条纹后, 由于投影仪的镜头畸变引起的相位误差  $(\Delta\Phi_{a,h}, \Delta\Phi_{a,v})$ 。

映射计算模块 13, 用于定义垂直于投影仪镜头光轴的一平面 G, 根据所述相位误差计算平面 G 与投影平面的映射关系。

在本实施方式中, 所述映射计算模块 13 具体用于:

利用所述绝对相位  $(\Phi_{m,h}, \Phi_{m,v})$ , 建立投影平面与相机像面之间等相位点对

的映射关系为  $\begin{cases} s_1 = \frac{\Phi_{m,h}(i, j)}{2\pi p} \\ t_1 = \frac{\Phi_{m,v}(i, j)}{2\pi p} \end{cases}$ , 其中,  $(s_1, t_1)$  为投影平面上的像素点,  $(i, j)$  像

素点的相位与相机像面上的像素点  $(i, j)$  的相位相等;

根据得到的相位误差  $(\Delta\Phi_{a,h}, \Delta\Phi_{a,v})$  建立三维数据点集  $(s_1, t_1, \Delta\Phi_{a,h}(i, j))$  和  $(s_1, t_1, \Delta\Phi_{a,v}(i, j))$ ;

利用泽尼克多项式拟合上述两个三维数据点集  $(s_1, t_1, \Delta\Phi_{a,h}(i, j))$  和  $(s_1, t_1, \Delta\Phi_{a,v}(i, j))$ ，根据拟合的系数计算投影平面上整数像素点  $(s, t)$  的相位误差  $(\Delta\Phi_{a,h}(s, t), \Delta\Phi_{a,v}(s, t))$ ;

通过公式 
$$\begin{cases} s_2 = s + \frac{\Delta\Phi_{a,h}(s, t)}{2\pi p} \\ t_2 = t + \frac{\Delta\Phi_{a,v}(s, t)}{2\pi p} \end{cases}$$
 建立平面 G 和投影平面之间的映射关系, 其中,

$(s_2, t_2)$  为平面 G 在投影平面上的映射点。

条纹生成模块 14, 用于根据所述映射关系, 生成变频、相移自适应条纹用于投影, 使得投影仪投出的条纹在平面 G 上为标准的正弦条纹。

在本实施方式中, 所述条纹生成模块 14 具体用于:

定义期望在平面 G 上获得的条纹图的相位分布;

根据建立的映射关系以及平面 G 上的相位分布, 计算投影平面上整数像素点的相位  $\Phi_p^A(s, t)$ ;

利用公式  $I_P^A(s, t) = \frac{I_{\max}}{2} (1 + \cos(\Phi_P^A(s, t)))$  生成自适应条纹图, 其中,  $I_P^A(s, t)$  表示自适应条纹图在像素点  $(s, t)$  处的强度,  $I_{\max}$  表示自适应条纹图的最大强度。

本发明提供了一种基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正系统 10, 无需标定投影仪和测量系统参数, 如投影仪的镜头畸变系数、投影仪和相机光轴之间的夹角等, 能够降低计算复杂度、改善测量结果的精度, 适用于任意设置的条纹投射测量系统。

为了测试基于自适应条纹的投影仪镜头畸变误差校正方法的有效性, 对一陶瓷板(平面度小于 0.01mm)测量。首先利用本发明所提方法生成一套变频(条纹宽度分别为 13,14,15 个像素)、相移(四步相移)自适应条纹, 然后将其依次投射到标准平板上, 并通过相机记录条纹图, 采用条纹分析技术处理条纹图像。图 3(a) 为实际测量相位减去载波相位后的残差分布, 图 3(b) 为重建的平板

三维数据。为了计算重建结果的精度，采用最小二乘拟合算法拟合平板的测量结果，图 3 (c) 为测量三维数据与拟合结果的偏差分布。同时，为了与常规条纹投射测量方法比较，利用计算机生成一套标准的相移正弦条纹图，并投射到陶瓷平板上测量。图 3 (d) 为投射标准正弦相移条纹图后恢复的相位误差。从图中可知，投影仪的镜头畸变会导致投射的条纹图变形，使得相位恢复结果中存在误差，影响三维重建结果的精度，而采用本发明所提方法能够有效抑制投影仪镜头畸变对条纹图的影响，获得准确的三维重建结果。

此外，为了检验本发明方法的重复性和精度，将陶瓷板任意摆放在 11 处不同的位置，在每个位置处，利用本发明所提方法向陶瓷板投射自适应条纹图，并重建三维测量结果，最后利用最小二乘拟合算法计算测量数据与拟合结果之间的偏差。表 1 统计了 11 处测量结果的偏差的 PV (Peak to valley) 值和 RMS (Root-mean-square) 值。

表 1. 陶瓷平面 11 次测量的统计结果

	Mean	Std	Maximum	Minimum
PV	0.1993	0.0147	0.2165	0.1738
RMS	0.0213	0.0012	0.0228	0.0195

从表中可知，本发明所提方法能够在系统测量空间内获得稳定的测量结果。同时，为了检验本发明所提方法的精度，将陶瓷平板安装在高精度的移动导轨（分辨率为  $1.25 \mu\text{m}$ ），通过该导轨将陶瓷板分别移动在不同的位置。在每个位置处，采用本发明所提方法向陶瓷板投射自适应条纹图，并重建三维测量结果。图 4 为陶瓷平板中心区域某一截线轮廓的测量结果。从图中可知，利用本发明所提方法的重建误差为  $\pm 0.1\text{mm}$ 。

最后，为了与现有投影仪标定方法比较，采用相位辅助法标定投影仪。图 5 为投影仪和相机标定结果的重投影误差，从图中可知，投影仪标定结果的重投影误差比相机标定结果的重投影误差大，这一结果证明投影仪标定方法的精

度明显低于相机的标定精度。利用上述标定结果对同一陶瓷平板测量，并采用文献中所述方法重建三维数据，图 6 为重建三维数据与最小二乘拟合结果的偏差分布，从图中可知重建结果误差的 PV 和 RMS 值分别为 0.378mm 和 0.035mm。此外，图中边缘区域的重建误差明显大于中心区域，这主要是因为投影仪的标定结果存在一定的误差，假设实际像点与像面中心点的距离为  $d$ ，当采用非线性畸变模型计算与实际像点对应的理想像点时，计算误差随着  $d$  的增大而增加，最终导致边缘重建结果的精度明显低于中心区域。上述测量结果间接证明了本发明所提方法能够有效抑制投影仪的镜头畸变误差，提高三维重建结果的精度。

值得注意的是，上述实施例中，所包括的各个单元只是按照功能逻辑进行划分的，但并不局限于上述的划分，只要能够实现相应的功能即可；另外，各功能单元的具体名称也只是为了便于相互区分，并不用于限制本发明的保护范围。

另外，本领域普通技术人员可以理解实现上述各实施例方法中的全部或部分步骤是可以通程序来指令相关的硬件来完成，相应的程序可以存储于一计算机可读取存储介质中，所述的存储介质，如 ROM/RAM、磁盘或光盘等。

以上所述仅为本发明的较佳实施例而已，并不用以限制本发明，凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

## 权利要求书

1. 一种基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正方法，其特征在于，所述方法包括：

步骤一、利用条纹投影测量系统获取标准平板的绝对相位；

步骤二、根据所述绝对相位，计算由于投影仪的镜头畸变引起的相位误差；

步骤三、定义垂直于投影仪镜头光轴的一平面 G，根据所述相位误差计算平面 G 与投影平面的映射关系；

步骤四、根据所述映射关系，生成变频、相移自适应条纹用于投影，使得投影仪投出的条纹在平面 G 上为标准的正弦条纹。

2. 如权利要求 1 所述的基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正方法，其特征在于，所述步骤一具体包括：

利用投影仪向标准平板分别投射一套竖直和水平的变频、相移正弦条纹图，然后采用条纹分析技术分析相机记录的正弦条纹图，并获得标准平板的绝对相位  $(\Phi_{m,h}, \Phi_{m,v})$ 。

3. 如权利要求 2 所述的基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正方法，其特征在于，所述步骤二具体包括：

利用公式  $\Phi_c(i, j) = \frac{r + si + tj}{1 + ui + vj}$ ，拟合测量的绝对相位获得载波相位分布，其中， $\Phi_c(i, j)$  表示在像素点  $(i, j)$  处拟合的载波相位， $r, s, t, u, v$  表示与系统参数相关的系数；

然后将测量的绝对相位  $(\Phi_{m,h}, \Phi_{m,v})$  减去拟合的载波相位  $\Phi_c(i, j)$ ，即可获得由于投影仪的镜头畸变引起的相位误差  $(\Delta\Phi_{a,h}, \Delta\Phi_{a,v})$ 。

4. 如权利要求 3 所述的基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正方法，其特征在于，所述步骤三具体包括：

利用步骤一中测量的绝对相位  $(\Phi_{m,h}, \Phi_{m,v})$ ，建立投影平面与相机像面之间

等相位点对的映射关系为  $\begin{cases} s_1 = \frac{\Phi_{m,h}(i, j)}{2\pi p} \\ t_1 = \frac{\Phi_{m,v}(i, j)}{2\pi p} \end{cases}$ ，其中， $(s_1, t_1)$  为投影平面上的像素点，

$(s_1, t_1)$  像素点的相位与相机像面上的像素点  $(i, j)$  的相位相等；

根据步骤二中得到的相位误差  $(\Delta\Phi_{a,h}, \Delta\Phi_{a,v})$  建立三维数据点集  $(s_1, t_1, \Delta\Phi_{a,h}(i, j))$  和  $(s_1, t_1, \Delta\Phi_{a,v}(i, j))$ ；

利用泽尼克多项式拟合上述两个三维数据点集  $(s_1, t_1, \Delta\Phi_{a,h}(i, j))$  和  $(s_1, t_1, \Delta\Phi_{a,v}(i, j))$ ，根据拟合的系数计算投影平面上整数像素点  $(s, t)$  的相位误差  $(\Delta\Phi_{a,h}(s, t), \Delta\Phi_{a,v}(s, t))$ ；

通过公式  $\begin{cases} s_2 = s + \frac{\Delta\Phi_{a,h}(s, t)}{2\pi p} \\ t_2 = t + \frac{\Delta\Phi_{a,v}(s, t)}{2\pi p} \end{cases}$  建立平面 G 和投影平面之间的映射关系，其中，

$(s_2, t_2)$  为平面 G 在投影平面上的映射点。

5. 如权利要求 4 所述的基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正方法，其特征在于，所述步骤四具体包括：

定义期望在平面 G 上获得的条纹图的相位分布；

根据步骤三中建立的映射关系以及平面 G 上的相位分布，计算投影平面上整数像素点的相位  $\Phi_p^A(s, t)$ ；

利用公式  $I_P^A(s, t) = \frac{I_{\max}}{2} (1 + \cos(\Phi_p^A(s, t)))$  生成自适应条纹图，其中， $I_P^A(s, t)$  表示自适应条纹图在像素点  $(s, t)$  处的强度， $I_{\max}$  表示自适应条纹图的最大强度。

6. 一种基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正系统，其特征在于，所述系统包括：

相位获取模块，用于利用条纹投影测量系统获取标准平板的绝对相位；

误差计算模块，用于根据所述绝对相位，计算由于投影仪的镜头畸变引起

的相位误差;

映射计算模块, 用于定义垂直于投影仪镜头光轴的一平面 G, 根据所述相位误差计算平面 G 与投影平面的映射关系;

条纹生成模块, 用于根据所述映射关系, 生成变频、相移自适应条纹用于投影, 使得投影仪投出的条纹在平面 G 上为标准的正弦条纹。

7. 如权利要求 6 所述的基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正系统, 其特征在于, 所述相位获取模块具体用于:

利用投影仪向标准平板分别投射一套竖直和水平的变频、相移正弦条纹图, 然后采用条纹分析技术分析相机记录的正弦条纹图, 并获得标准平板的绝对相位  $(\Phi_{m,h}, \Phi_{m,v})$ 。

8. 如权利要求 7 所述的基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正系统, 其特征在于, 所述误差计算模块具体用于:

利用公式  $\Phi_c(i, j) = \frac{r + si + tj}{1 + ui + vj}$ , 拟合测量的绝对相位获得载波相位分布, 其中,  $\Phi_c(i, j)$  表示在像素点  $(i, j)$  处拟合的载波相位,  $r, s, t, u, v$  表示与系统参数相关的系数;

然后将测量的绝对相位  $(\Phi_{m,h}, \Phi_{m,v})$  减去拟合的载波相位  $\Phi_c(i, j)$ , 即可获得由于投影仪的镜头畸变引起的相位误差  $(\Delta\Phi_{a,h}, \Delta\Phi_{a,v})$ 。

9. 如权利要求 8 所述的基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正系统, 其特征在于, 所述映射计算模块具体用于:

利用所述绝对相位  $(\Phi_{m,h}, \Phi_{m,v})$ , 建立投影平面与相机像面之间等相位点对

的映射关系为  $\begin{cases} s_1 = \frac{\Phi_{m,h}(i, j)}{2\pi p} \\ t_1 = \frac{\Phi_{m,v}(i, j)}{2\pi p} \end{cases}$ , 其中,  $(s_1, t_1)$  为投影平面上的像素点,  $(s_1, t_1)$  像

素点的相位与相机像面上的像素点  $(i, j)$  的相位相等;

根据得到的相位误差  $(\Delta\Phi_{a,h}, \Delta\Phi_{a,v})$  建立三维数据点集  $(s_1, t_1, \Delta\Phi_{a,h}(i, j))$  和  $(s_1, t_1, \Delta\Phi_{a,v}(i, j))$ ;

利用泽尼克多项式拟合上述两个三维数据点集  $(s_1, t_1, \Delta\Phi_{a,h}(i, j))$  和  $(s_1, t_1, \Delta\Phi_{a,v}(i, j))$ , 根据拟合的系数计算投影平面上整数像素点  $(s, t)$  的相位误差  $(\Delta\Phi_{a,h}(s, t), \Delta\Phi_{a,v}(s, t))$ ;

通过公式 
$$\begin{cases} s_2 = s + \frac{\Delta\Phi_{a,h}(s, t)}{2\pi p} \\ t_2 = t + \frac{\Delta\Phi_{a,v}(s, t)}{2\pi p} \end{cases}$$
 建立平面 G 和投影平面之间的映射关系, 其中,

$(s_2, t_2)$  为平面 G 在投影平面上的映射点。

10. 如权利要求 9 所述的基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正系统, 其特征在于, 所述条纹生成模块具体用于:

定义期望在平面 G 上获得的条纹图的相位分布;

根据建立的映射关系以及平面 G 上的相位分布, 计算投影平面上整数像素点的相位  $\Phi_p^A(s, t)$ ;

利用公式  $I_p^A(s, t) = \frac{I_{\max}}{2} (1 + \cos(\Phi_p^A(s, t)))$  生成自适应条纹图, 其中,  $I_p^A(s, t)$  表示自适应条纹图在像素点  $(s, t)$  处的强度,  $I_{\max}$  表示自适应条纹图的最大强度。



## 说明书摘要

---

本发明提供一种基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正方法，其中，所述方法包括：利用条纹投影测量系统获取标准平板的绝对相位；根据所述绝对相位，计算由于投影仪的镜头畸变引起的相位误差；定义垂直于投影仪镜头光轴的一平面 G，根据所述相位误差计算平面 G 与投影平面的映射关系；根据所述映射关系，生成变频、相移自适应条纹用于投影，使得投影仪投出的条纹在平面 G 上为标准的正弦条纹。本发明还提供一种基于自适应条纹的投影仪镜头畸变校正系统。本发明提供的技术方案能够改善测量精度、降低了计算复杂度，能够缩短前期准备的时间，能够适用于任意设置的条纹投射测量系统。

# 说明书附图

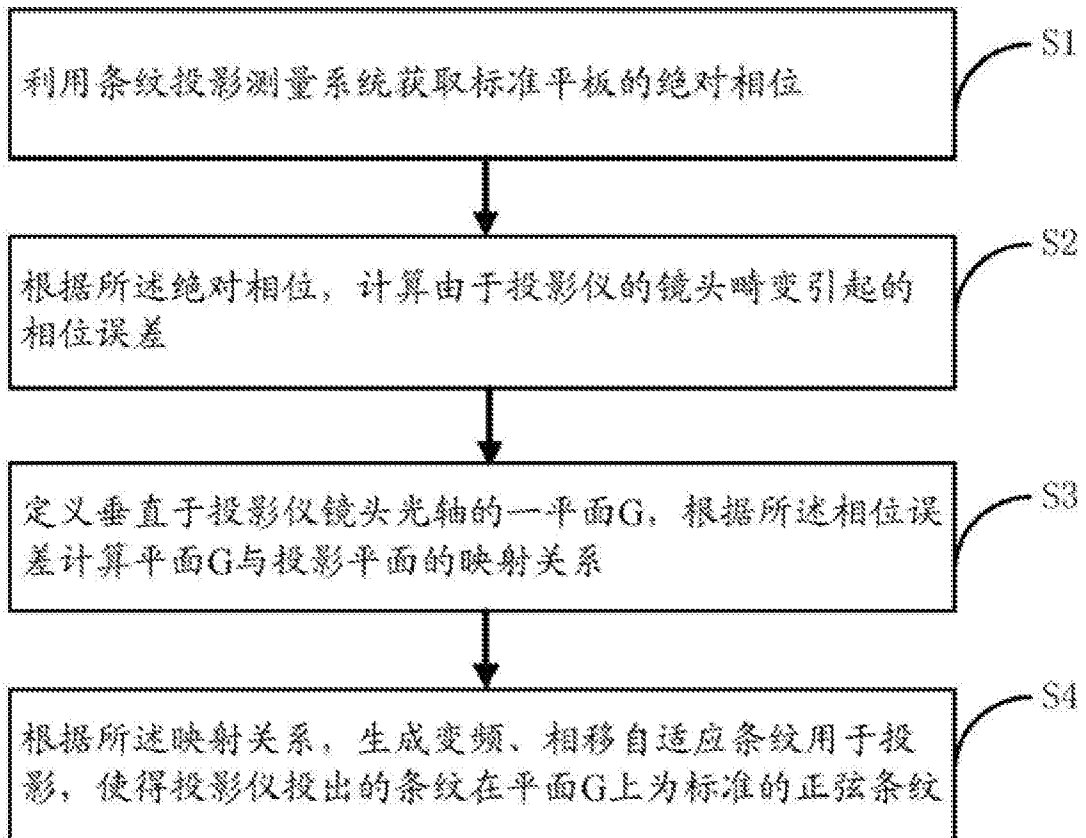


图 1

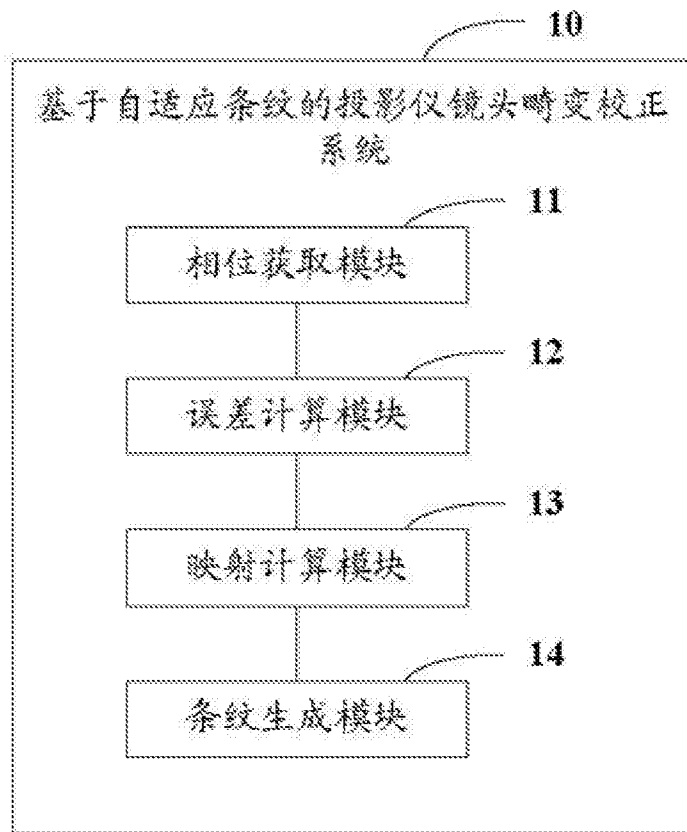


图 2

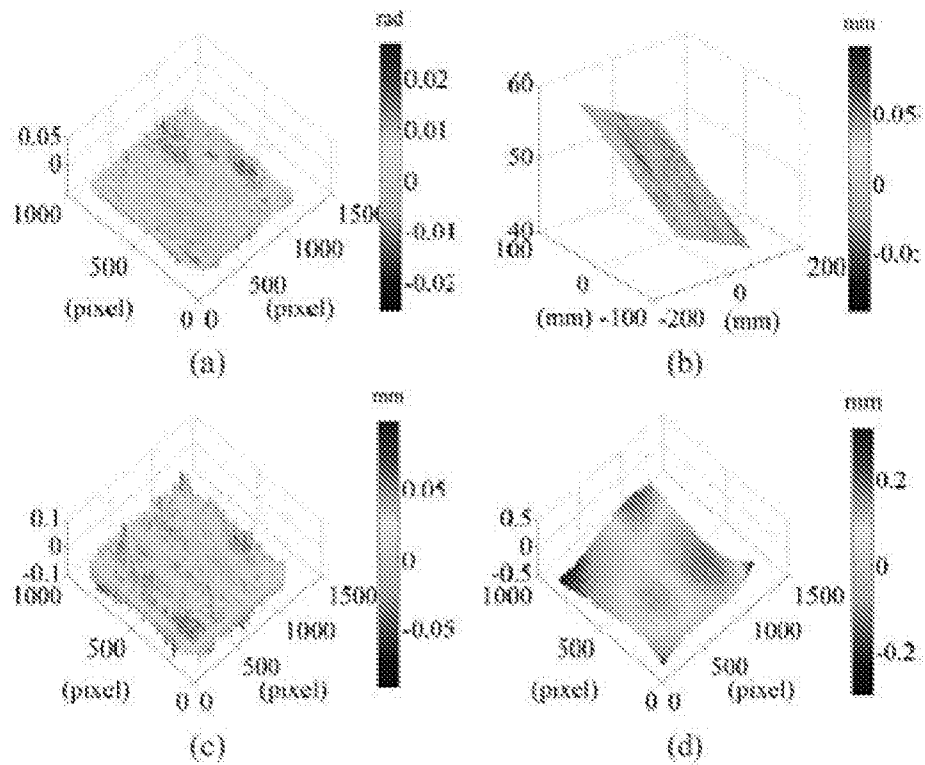


图 3

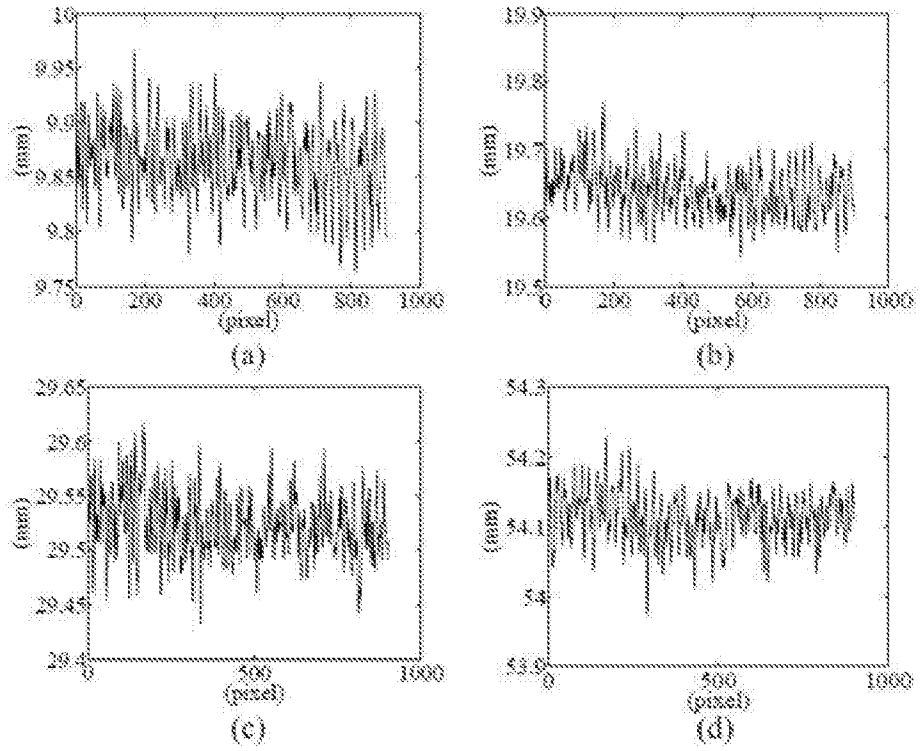


图 4

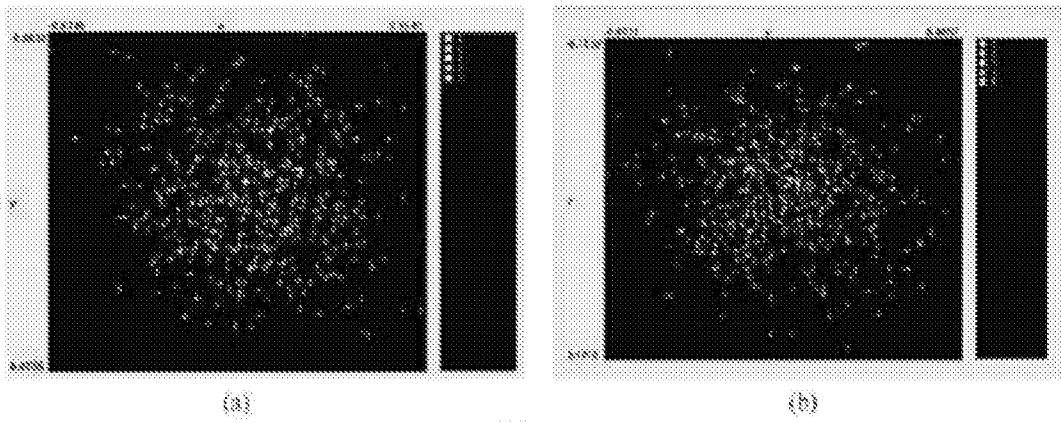


图 5

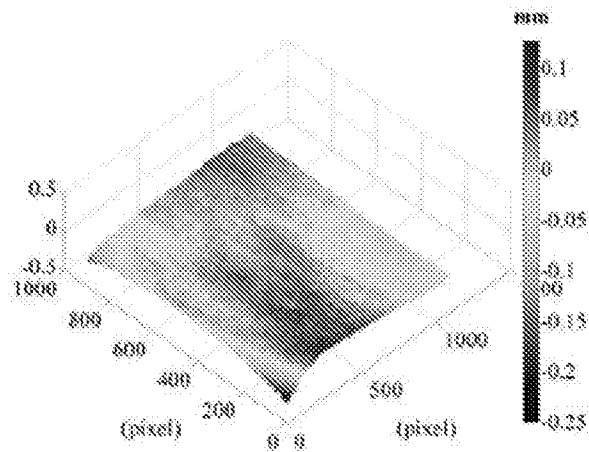


图 6