

文章编号 1004-924X(2015)08-2384-09

相位高度的显函数模型及其标定

张 旭^{1,2,3,*}, 李 祥¹, 屠大维^{1,2}

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院 上海 200072; 2. 上海市智能制造及机器人重点实验室 上海 200072;
3. 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 由于传统的相位轮廓术(PMP)使用的相位高度模型参数存储空间大, 标定计算成本高, 本文由绝对相位与深度坐标的关系推导出相位差高度模型的显函数模型, 并提出了一种基于未知标定平面的灵活标定方法。该模型只需 9 个非共线的像素数据即可计算出模型的 15 个参数, 降低了计算量, 节约了内存空间。提出的标定方法无需精密运动台, 标定板无需覆盖整个测量范围, 无需知道位置姿态, 降低了标定成本, 提高了标定的灵活性。对提出的模型和标定方法分别进行了仿真和实验, 仿真结果验证了相位高度显函数模型的正确性和标定方法的有效性。对提出的模型和标定方法在实际的结构光系统中进行了实验, 用标定后的系统对实际物体进行了测量, 结果表明三维曲面具有较高的质量, 证明了提出方法的可行性。

关键词: 相位轮廓术; 相位高度模型; 显函数模型; 标定

中图分类号: TP391; TB92 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20152308. 2384

Explicit phase height model and its calibration

ZHANG Xu^{1,2,3,*}, LI Xiang¹, TU Da-wei^{1,2}

(1. *School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;*
2. *Shanghai Key Laboratory of Intelligent Manufacturing and Robotics, Shanghai 200072, China;*
3. *State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai 200240, China*)

* *Corresponding author, E-mail: xuzhang@shu.edu.cn*

Abstract: As the phase height model in traditional Phase Measuring Profilometry (PMP) has a larger storage space and higher calibration cost, this paper deduces an explicit function model of phase difference height according to the relationship between absolute phase and depth coordinate, and proposes a flexible calibration method based on unknown calibration plane. The model can calculate 15 model parameters only by 9 nonlinear pixel data, so it saves the memory space and reduces the computing cost. The proposed calibration method does not need any movement platform and position posture, and brings the advantage of small calibration board and well flexible ability. The simulation and experiment on the model and calibration method are performed. The simulation results verify the validity of explicit function model of phase difference height and the availability of the proposed calibration method. Moreover, an actual experiment for the model and the calibration method is done in a structure

收稿日期: 2015-03-26; **修订日期:** 2015-05-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51205244); 机械系统与振动国家重点实验室科研资金资助项目 (No. MSV2015010); 上海市教育委员会科研创新资金资助项目 (No. 14YZ006)。

light system. The calibrated system is used to test a real objective, and the results show that the 3D curved surface has higher quality, which demonstrates the proposed method is feasibility.

Key words: phase profilometry; phase height model; explicit function model; calibration

1 引言

相位轮廓术(Phase Measuring Profilometry, PMP)是一种基于主动立体视觉的光学三维测量方法,具有非接触、高速度、高精度、大数据量、大工作距离、材料适用范围广等优点,在工业检测、文物数字化、人体测量等多个领域得到了广泛应用^[1-4]。实施 PMP 首先要计算有一定相位差的多幅光栅条纹图像中每个像素的相位值,然后根据相位高度模型由相位值计算观察点的深度信息^[5-7]。其中,相位高度模型的确立和标定是计算深度信息的先决条件,同时也是影响三维测量精度的重要因素。

相位高度模型用于建立每个摄像机像素上相位差和高度的对应关系^[8-14]。它选择一个参考平面作为世界坐标系的 X-Y 平面。将参考平面上计算的相位作为参考相位,任意三维点的计算相位与其参考相位的差定义为相位差。高度为三维空间点到参考平面的有向距离,实际上,其等效于 Z 坐标值。W. S. Zhou 和 X. Y. Su^[8]首先提出了相位差倒数与高度倒数之间的线性关系,并通过理论分析证明了共面光轴符合此原理。Y. Xiao 等^[10]根据几何模型从另外一个角度推导出了在共面光轴下相位差倒数和高度差倒数的线性关系模型。对于光轴非共面情况,H. Guo 等^[11]和 Y. Wen 等^[13]进行了几何分析,并推导出了在其几何参数下的线性系数关系。该类方法可通过直接标定相位高度模型参数,确定相位高度模型。

近期,一些学者建立了绝对相位和 Z_w 坐标之间的关系模型^[15-19],在该模型中,同样选择参考平面作为 X-Y 平面,但 Z_w 的坐标不是由相位差确定的,而是由绝对相位获得的。H. Du 和 Z. Wang^[15]首先从几何角度推导出绝对相位与 Z_w 坐标之间的关系,该模型是绝对相位、高度、像素坐标的二次多项式除法。S. Cui 和 X. Zhu^[16]从矩阵角度推导出相同的相位高度模型。以后,学者们还把投影机镜头和摄像机的镜头畸变也列入考虑范围^[18-19]。

上述两种相位高度模型从两个不同的模型体系

阐释了 PMP 的深度计算方法,显然他们之间存在着内在联系或统一性。本文即针对这一问题展开研究,建立了两种模型之间的联系,推导出相位差高度模型的显函数模型,并针对这一模型提出了一种基于未知标定平面的灵活标定方法。最后通过仿真和真实实验验证了模型的正确性和标定方法的有效性。

2 相移高度的显函数模型

传统相位高度模型^[8-14]可表示为:

$$\frac{1}{h(\tilde{\mathbf{m}}_c)} = a(\tilde{\mathbf{m}}_c) + b(\tilde{\mathbf{m}}_c) \frac{1}{\varphi(\tilde{\mathbf{m}}_c)}, \quad (1)$$

其中:任意一个摄像机像素位置的齐次坐标为: $\tilde{\mathbf{m}}_c = [u_c \quad v_c \quad 1]^T$, 该像素对应的相位差和高度分别为 $\varphi(\tilde{\mathbf{m}}_c)$ 和 $h(\tilde{\mathbf{m}}_c)$ 。线性关系系数 $a(\tilde{\mathbf{m}}_c)$, $b(\tilde{\mathbf{m}}_c)$ 是像素坐标的函数,每个像素对应的系数各不相同。

近期,一些学者提出将绝对相位和 Z_w 坐标之间的关系^[15-19]表达为多项式除法的形式:

$$Z_w = \frac{\mathbf{n}_0^T \tilde{\mathbf{m}}_c + \mathbf{d}_0^T \tilde{\mathbf{m}}_c \phi}{\mathbf{n}_1^T \tilde{\mathbf{m}}_c + \mathbf{d}_1^T \tilde{\mathbf{m}}_c \phi}, \quad (2)$$

其中: $\mathbf{n}_0, \mathbf{n}_1, \mathbf{d}_0, \mathbf{d}_1$ 是 3×1 的列向量; ϕ 为绝对相位,也是计算出的投射相位。

根据公式(2)可知,当 Z_w 坐标为参考平面的值 Z_{ref} 时,其与该平面的相位分布 ϕ_{org} 存在如下关系:

$$Z_{\text{ref}} = \frac{\mathbf{n}_0^T \tilde{\mathbf{m}}_c + \mathbf{d}_0^T \tilde{\mathbf{m}}_c \phi_{\text{org}}}{\mathbf{n}_1^T \tilde{\mathbf{m}}_c + \mathbf{d}_1^T \tilde{\mathbf{m}}_c \phi_{\text{org}}}. \quad (3)$$

根据相位差的定义可知:任意三维点的计算相位减去参考平面的计算相位则为该点的相位差:

$$\varphi = \phi - \phi_{\text{org}}, \quad (4)$$

此三维点相对于参考平面的高度为:

$$h = Z_w - Z_{\text{ref}}, \quad (5)$$

根据公式(2) ~ (5)可得如下关系(详细证明请见附录 A):

$$\frac{1}{h} = \frac{\mathbf{d}_1^T \tilde{\mathbf{m}}_c}{(\mathbf{d}_1^T - Z_{\text{ref}} \mathbf{d}_1^T) \tilde{\mathbf{m}}_c} + \frac{\tilde{\mathbf{m}}_c^T (\mathbf{n}_1 \mathbf{d}_1^T - \mathbf{d}_1 \mathbf{n}_1^T) \tilde{\mathbf{m}}_c}{\tilde{\mathbf{m}}_c^T ((\mathbf{d}_0 - Z_{\text{ref}} \mathbf{d}_0) (\mathbf{d}_1^T - Z_{\text{ref}} \mathbf{d}_1^T)) \tilde{\mathbf{m}}_c} \times \frac{1}{\varphi}. \quad (6)$$

由公式(6)与公式(1)对比可知,线性系数 a , b 可表达为 $\mathbf{n}_0, \mathbf{n}_1, \mathbf{d}_0, \mathbf{d}_1, \tilde{\mathbf{m}}_c$ 的函数:

$$\begin{cases} a(\tilde{\mathbf{m}}_c) = \frac{\mathbf{d}_1^T \tilde{\mathbf{m}}_c}{(\mathbf{d}_0^T - Z_{\text{ref}} \mathbf{d}_1^T) \tilde{\mathbf{m}}_c} \\ b(\tilde{\mathbf{m}}_c) = \frac{\tilde{\mathbf{m}}_c^T \{ \mathbf{n}_1 \mathbf{d}_0^T - \mathbf{d}_1 \mathbf{n}_0^T \} \tilde{\mathbf{m}}_c}{\tilde{\mathbf{m}}_c^T \{ (\mathbf{d}_0 - Z_{\text{ref}} \mathbf{d}_1) (\mathbf{d}_0^T - Z_{\text{ref}} \mathbf{d}_1^T) \} \tilde{\mathbf{m}}_c} \end{cases} \quad (7)$$

不失一般性,选择参考平面作为世界坐标系的 XY 平面时,即 $Z_{\text{ref}}=0$ 时,公式(7)可转变为:

$$\begin{aligned} a(\tilde{\mathbf{m}}_c) &= \frac{\mathbf{d}_1^T \tilde{\mathbf{m}}_c}{\mathbf{d}_0^T \tilde{\mathbf{m}}_c} \\ b(\tilde{\mathbf{m}}_c) &= \frac{\tilde{\mathbf{m}}_c^T \mathbf{E} \tilde{\mathbf{m}}_c}{\tilde{\mathbf{m}}_c^T \mathbf{F} \tilde{\mathbf{m}}_c} \quad (8) \\ \mathbf{E} &= \mathbf{n}_1 \mathbf{d}_0^T - \mathbf{d}_1 \mathbf{n}_0^T \\ \mathbf{F} &= \mathbf{d}_0 \mathbf{d}_0^T \end{aligned}$$

由公式(8)可知,相位差与高度模型的影射关系是由 $\mathbf{n}_0, \mathbf{n}_1, \mathbf{d}_0, \mathbf{d}_1, \tilde{\mathbf{m}}_c$ 决定的。只要标定出 $\mathbf{d}_0, \mathbf{d}_1, \mathbf{E}, \mathbf{F}$, 即可确定相位差与高度模型。 \mathbf{E}, \mathbf{F} 是 3×3 的矩阵。因此,相位差和高度函数模型的标定转化为确定 15 个参数(\mathbf{d}_0 和 \mathbf{d}_1 各 3 个, \mathbf{E} 为 9 个参数, \mathbf{F} 由 \mathbf{d}_0 获得)。根据公式(8)可以对线性系数 a, b 作如下的几何解释: a 是两条直线的比值; b 是两个二次曲线的比值。直线和二次曲线都以像素为自变量。

3 相位高度模型的标定方法

为了实现相位高度模型的显函数表达,本文提出未知平面的标定方法。具体为:黑白格标定板以未知姿态放置在 PMP 系统的测量范围内,分别投射均匀白光和相移技术图案,并获得相应图像数据。对获取的多个位姿(至少 3 个)数据,依次进行摄像机标定、绝对相位计算,高度值计算和参数估计。

摄像机标定采用基于平面单应性的标定方法,即计算摄像机的内参数和每个标定板相对于摄像机坐标系的外参数,详细过程请参阅文献[20];使用多步相移技术和基于健壮中国剩余定理的解卷绕技术^[21],计算每个摄像机像素投射绝对相位;计算时通过已经标定的摄像机确定每个像素在标定板上的三维位置获得高度值,详细算法见 3.1 节;根据获得的像素、绝对相位、三维位置点对相位高度模型中的参数进行估计计算,详细算法见 3.2 节。

3.1 高度值计算

在完成摄像机标定后,摄像机的内参数和每个

标定板姿态则为已知。对于给定的像素坐标 $\tilde{\mathbf{m}}_c$, 求得与其对应的在标定板平面上的三维坐标点。

根据摄像机的内参数 \mathbf{K} , 可得畸变的投射投影坐标 $\tilde{\mathbf{m}}_d$:

$$\tilde{\mathbf{m}}_d = \mathbf{K}^{-1} \tilde{\mathbf{m}}_c \quad (9)$$

根据摄像机的畸变参数 $\delta = [k_1 \quad k_2 \quad p_1 \quad p_2]$, 可将畸变坐标矫正为透视投影坐标 $\tilde{\mathbf{m}}_n$ 。由于图像畸变是非线性方程,不存在解析解,所以本文采用迭代方法求取逼近解^[22]。

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_n^i &= \mathbf{m}_d^i - f_n(\mathbf{m}_d^i, \delta) \\ \mathbf{m}_d^{i+1} &= \mathbf{m}_n^i \end{aligned} \quad (10)$$

其中:摄像机的畸变模型为:

$$\begin{aligned} f_n(\mathbf{m}_n, \delta) &= (k_1 r^2 + k_2 r^4) \mathbf{m}_n + \\ & \begin{bmatrix} 2 p_1 u_n v_n + p_2 (r^2 + 2 u_n^2) \\ p_1 (r^2 + 2 v_n^2) + 2 p_2 u_n v_n \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

标定板与投射投影坐标存在以下关系:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{m}}_n &= \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{r}_3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\text{plane}} \\ Y_{\text{plane}} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \\ & \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\text{plane}} \\ Y_{\text{plane}} \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

其中:摄像机外参数 $\mathbf{R} = [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{r}_3]$, t 为已知。则对公式(12)求逆,可得三维对应点。

$$\begin{bmatrix} X_{\text{plane}} \\ Y_{\text{plane}} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'/Z' \\ Y'/Z' \\ Z'/Z' \end{bmatrix} \quad \text{其中,} \quad \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad t]^{-1} \tilde{\mathbf{m}}_n \quad (13)$$

该三维对应点在摄像机坐标系下的坐标为:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad t] \begin{bmatrix} X_{\text{plane}} \\ Y_{\text{plane}} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

由此获得了任意摄像机像素在三维标定板上的坐标。设定参考平面平行于摄像机图像(即摄像机坐标系的 X-Y 平面),及参考平面到摄像机坐标系的距离 d_{ref} , 则由公式(14)计算出的三维点坐标转换到参考平面下的坐标为:

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c - d_{\text{ref}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中: X_w, Y_w 是参考平面坐标值, Z_w 是高度值。

3.2 参数估计方法

对于某个像素,当已知 3 组以上的三维点坐标及相位差时,使用最小二乘法可估计出该像素的 a, b 值:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/\varphi_1 \\ 1 & 1/\varphi_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & 1/\varphi_i \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1/h_1 \\ 1/h_2 \\ \vdots \\ 1/h_i \end{bmatrix}. \quad (16)$$

当已知 6 个非共线像素的数据时,采用奇异值分解法可确定 $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_0$ 的参数,即最小特征值对应的特征向量:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{d}_1 \\ \mathbf{d}_0 \end{bmatrix} = \min_{\text{vector}} \left\{ \text{SVD} \left[\begin{array}{cc} \tilde{\mathbf{m}}_1^T & \alpha_1 \tilde{\mathbf{m}}_1^T \\ \tilde{\mathbf{m}}_2^T & \alpha_2 \tilde{\mathbf{m}}_2^T \\ \vdots & \vdots \\ \tilde{\mathbf{m}}_i^T & \alpha_i \tilde{\mathbf{m}}_i^T \end{array} \right] \right\}, \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{n}_0 \\ \mathbf{n}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & -\mathbf{d}_1 \mathbf{d}_0^T \\ -\mathbf{d}_1^T \mathbf{d}_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\mathbf{d}_1^T \mathbf{d}_1 & 0 \\ 0 & 0 & -\mathbf{d}_1^T \mathbf{d}_1 \end{bmatrix}$$

\mathbf{d}_0 由公式(17)计算得到。当模型参数 $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_0, \mathbf{E}$ 完全确定后,则可计算任意像素和相位差下对应的高度值。

4 仿 真

首先对本文提出的相位高度显函数模型进行仿真。不失一般性,PMP 由一个摄像机和一个投影机组成,它们的分辨率都是 1 024 pixel×768

当已知 9 个非共线像素的数据时,采用最小二乘法可估计出相位高度模型的参数:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{11} \\ \mathbf{E}_{21} \\ \mathbf{E}_{31} \\ \mathbf{E}_{12} \\ \mathbf{E}_{22} \\ \mathbf{E}_{32} \\ \mathbf{E}_{13} \\ \mathbf{E}_{23} \\ \mathbf{E}_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \tilde{\mathbf{m}}_1^T & v_1 \tilde{\mathbf{m}}_1^T & \tilde{\mathbf{m}}_1^T \\ u_2 \tilde{\mathbf{m}}_2^T & v_2 \tilde{\mathbf{m}}_2^T & \tilde{\mathbf{m}}_2^T \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_i \tilde{\mathbf{m}}_i^T & v_i \tilde{\mathbf{m}}_i^T & \tilde{\mathbf{m}}_i^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} b_1 \tilde{\mathbf{m}}_1^T \mathbf{F} \tilde{\mathbf{m}}_1 \\ b_2 \tilde{\mathbf{m}}_2^T \mathbf{F} \tilde{\mathbf{m}}_2 \\ \vdots \\ b_i \tilde{\mathbf{m}}_i^T \mathbf{F} \tilde{\mathbf{m}}_i \end{bmatrix}, \quad (18)$$

其中,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{d}_0^T \mathbf{d}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{d}_0^T \mathbf{d}_0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{d}_0^T \mathbf{d}_0 \\ & & \mathbf{d}_0 \mathbf{d}_1^T \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{E} \mathbf{d}_0 \\ \mathbf{E}^T \mathbf{d}_0 \end{bmatrix},$$

pixel。投影机和摄像机的参数见表 1,其中包含了摄像机和投影机的内参数,畸变参数,相对位姿参数,参考平面相对于摄像机坐标系的参数。根据系统参数,可计算出相位高度显函数模型参数,详细见表 1 右侧第二列。可见,此系统参数具有相位高度显函数模型特性(见公式(8))。此外,对 PMP 系统参数随机进行 1 000 次计算,都能计算出相位高度显函数模型结果。

表 1 系统仿真参数

Tab. 1 System simulation parameters

PMP 系统参数		计算出的相位高度模型参数	
$\alpha_c = 2\ 204$	$\alpha_p = 2\ 187$	$\mathbf{n}_0 = \begin{bmatrix} 69.012\ 7 \\ 1.617 \\ -16\ 710.219\ 4 \end{bmatrix}$	$\mathbf{n}_1 = \begin{bmatrix} -0.049\ 3 \\ -0.001\ 2 \\ 39.350\ 2 \end{bmatrix}$
$\beta_c = 2\ 211$	$\beta_p = 2\ 200$		
$\gamma_c = 0$	$\gamma_p = 0$	$\mathbf{d}_0 = \begin{bmatrix} -0.205\ 8 \\ -0.128\ 2 \\ -1\ 122.901\ 5 \end{bmatrix}$	$\mathbf{d}_1 = \begin{bmatrix} 0.000\ 1 \\ 0.000\ 1 \\ 0.810\ 6 \end{bmatrix}$
$u_c^0 = 493$	$u_p^0 = 454$		
$v_c^0 = 448$	$v_p^0 = 789$	$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & 0.006\ 1 & 57.809\ 4 \\ -0.006\ 1 & 0 & 2.827\ 5 \\ -64.042\ 3 & -6.356\ 7 & -30\ 640.353\ 5 \end{bmatrix}$	
$[k_i^c\ k_s^c\ p_i^c\ p_s^c] = \mathbf{0}$	$[k_i^p\ k_s^p\ p_i^p\ p_s^p] = \mathbf{0}$		
$om_{cp} = [0.205\ 101\ -0.334\ 081\ -0.015\ 977\ 2]$			
$t_{cp} = [360\ -40\ -12]$			
$om_c = [0\ 0\ 0]$			
$t_{cp} = [0\ 0\ 1\ 400]$			

其次,对于本文提出的相位高度模型的正确性进行仿真验证。其中:相移分析技术采用四步相移法,相位解卷绕采用基于健壮中国剩余定理的相位解卷绕方法,采用的频率参数如下: $\Gamma_1=3$, $\Gamma_2=4$, $\Gamma_3=5$, $M=20$ 。对生成的正弦条纹图像序列由投影机按照其参数投射出来。根据光线跟踪原理,计算光线与空间平面的交点,该三维点经摄像机成像在图像平面上。三维平面是平行于摄像机图像的平面序列,平移距离分别如下: $t_{cp}^0=[0 \ 0 \ 1 \ 400]$, $t_{cp}^1=[0 \ 0 \ 1 \ 500]$, $t_{cp}^2=[0 \ 0 \ 1 \ 600]$, $t_{cp}^3=[0 \ 0 \ 1 \ 700]$, $t_{cp}^4=[0 \ 0 \ 1 \ 800]$, $t_{cp}^5=[0 \ 0 \ 1 \ 900]$ 。根据 PMP 的系统参数,获得了像素、三维平面点和相位差数据。为了验证本文提出的相位高度模型的正确性,将像素及相位差代入到公式(6),计算得到高度值,并将相位高度模型计算的高度值与理论高度作差,误差曲线如图 1 所示。由图 1 可见,相位高度模型可以正确地描述仿真数据。

最后,针对本文提出的标定方法进行仿真。根据仿真数据(像素、相位、高度),利用估计公式(16) (17) (18)计算相位高度显函数模型参数。

假设不存在亮度误差时,计算出的模型参数与理论结果完全一致,偏差和标准差均为零(如图 2 所示)。假设亮度噪声为正态分布,亮度噪声的标准差由 1 逐步增加到 5,得到的相位标准差按照误差传递模型线性增长^[21],如图 2(a)所示。同样,亮度噪声对相位高度模型的参数也会产生影响,相应的偏差和标准差结果如图 2 所示。从结果中可以看到:估计方法具有非常小的偏差和标准差,这进一步证明本文提出的标定方法是正确和有效的。

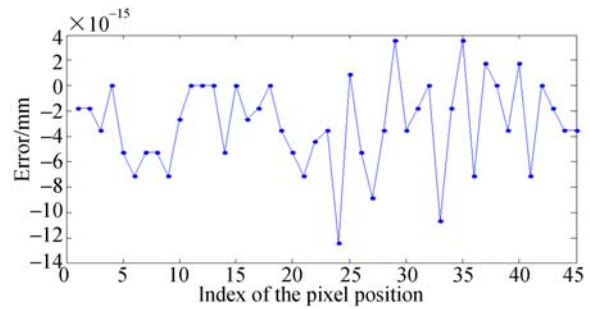
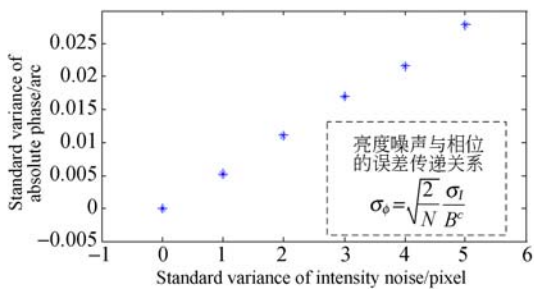
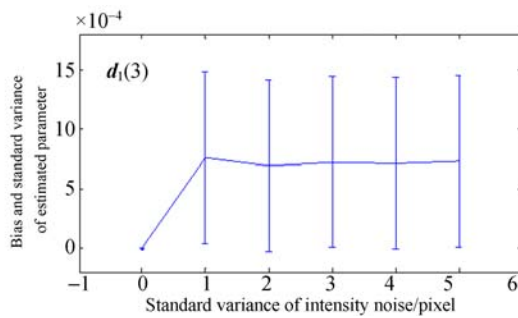


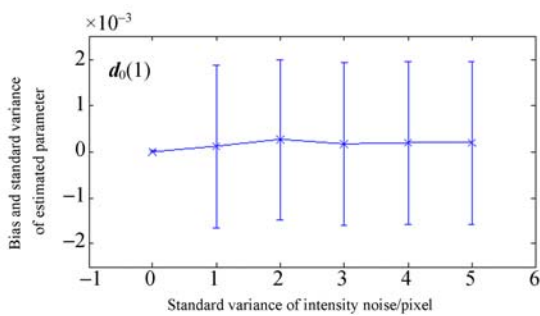
图 1 相位高度模型计算的高度值与理论高度的误差曲线
Fig. 1 Error curves of height computed by proposed model and theoretical height



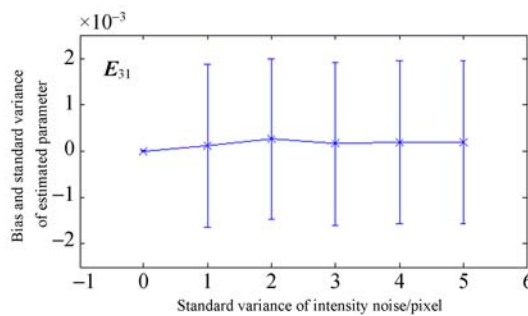
(a) 亮度误差与相位标准差的关系
(a) Relationship between intensity noise and absolute phase



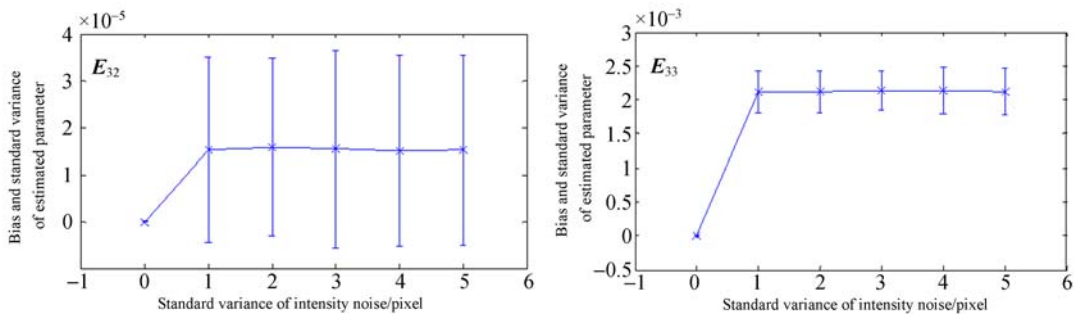
(b) 亮度误差与 $d_1(3)$ 估计偏差和标准差的关系
(b) Influence of intensity noise on estimated parameters for $d_1(3)$



(c) 亮度误差与 $d_0(1)$ 估计偏差和标准差的关系
(c) Influence of intensity noise on estimated parameters for $d_0(1)$



(d) 亮度误差与 E_{31} 估计偏差和标准差的关系
(d) Influence of intensity noise on estimated parameters for E_{31}



(e) 亮度误差与 E_{32} 估计偏差和标准差的关系
 (e) Influence of intensity noise on bias and standard variances for E_{32}

(f) 亮度误差与 E_{33} 估计偏差和标准差的关系
 (f) Influence of intensity noise on bias and standard variances for E_{33}

图 2 亮度误差对相位计算和估计参数的影响

Fig. 2 Influence of intensity noise on phase computation and estimated parameters

5 实验和分析

本文开发了一套结构光测量系统,由 2 个 CCD 摄像机(Point Grey FL2G-13S2C-C,采用的分辨率为 $1\ 296\ \text{pixel} \times 964\ \text{pixel}$)和一个 3LCD 投影仪(EPSON EB-C20X,采用的分辨率为 $1\ 024\ \text{pixel} \times 768\ \text{pixel}$)构成,如图 3 所示。在实验中右摄像机和投影机构成 PMP 测量系统。

投影仪的非线性(Gamma 效应)导致投射正弦条纹由单根谱线伸展成多谱线,从而降低了相位计算精度。因此,本系统先进行了 Gamma 标定,然后根据 Gamma 值对投射亮度进行 Gamma 矫正^[23-24]。4 种频率(1/60,1/80,1/100)分别

采用四步相移产生投射条纹,将相移条纹依次投射到黑白棋盘格上,再计算摄像机拍摄图案的卷绕相位,并根据健壮中国剩余定理获得绝对相位。在黑白棋盘格的同一位置上拍摄均匀亮度下的棋盘格图片,用于摄像机标定。变换棋盘格板到新的位姿重复拍摄相位条纹图片和摄像机标定图片。在多于 3 个位姿下获得标定数据,然后进行摄像机标定、绝对相位计算、高度值计算和参数估计。使用标定完毕的相位误差模型对 3 个物体(如图 3)进行测量,测量结果如图 4 所示。由图 4 可知,不仅大深度信息可正确恢复,局部纹理也清晰完整。实验验证了 PMP 系统的相位高度显函数模型及其标定方法的可行性和正确性。

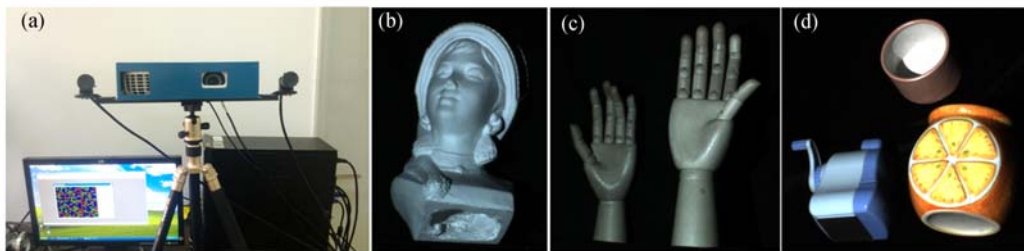


图 3 PMP 测量系统和测量对象

Fig. 3 Experiment setup and test objects

为了进一步验证本文方法的精度,使用显示器作为标准平面显示圆环特征图案,使用结构光系统的摄像机进行拍摄,并检测其特征点,如图 5 (a)所示。然后,在圆环中心处粘贴漫反射贴纸,关闭显示器,用摄像机拍摄由投影仪的投射相移

条纹,并计算绝对相位。根据图像特征点位置、绝对相位、相位高度模型计算三维点,如图 5(b)所示。对三维点两两计算相对距离,并与标准靶距离做差得到距离误差,如图 6 所示。由图 6 可知,本系统计算出的标靶三维点的平均距离误差为

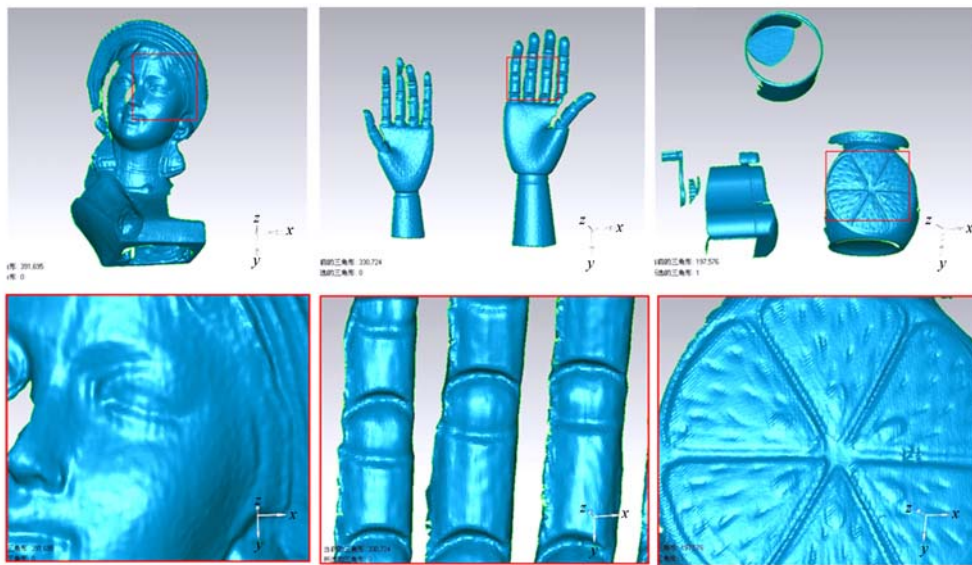
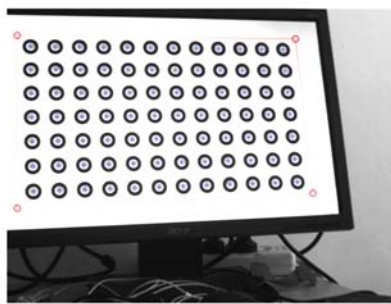


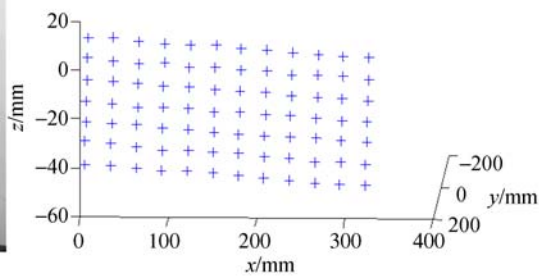
图 4 待测对象的三维测量结果

Fig. 4 3-D measurement results of test objects



(a)显示器标靶及特征检测

(a)Display target and feature detection



(b)本文方法计算出的三维点

(b)3D points computed by proposed system

图 5 系统精度验证

Fig. 5 Precision test of system

0.079 9 mm, 标准差为 0.098 mm。可见, 经过相位高度模型标定后, 该系统可实现对三维物体的较高精度测量。

6 结 论

传统相位高度模型认为相位差和高度的倒数具有线性关系, 每个像素的线性参数是系统几何参数的隐函数, 且在标定时认为各参数相互独立, 分别进行标定, 因而需要的参数存储空间大, 标定计算成本高。本文根据绝对相位与深度坐标的关系推导出相位差高度模型的显函数模型, 提出了一种基于未知标定平面的灵活标定方法。该模型只需 9 个非共线的像素数据即可计算出模型的 15 个参数, 降低了计算量, 节约了内存空间。另外, 本文标定方法无需精密运动台, 标定板无需覆

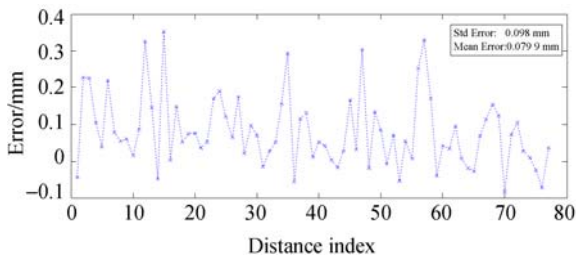


图 6 距离误差

Fig. 6 Error of measured distance

盖整个测量范围,也无需知道位置姿态,从而降低了标定成本,提高了标定的灵活性。

本文针对提出的模型和标定方法分别进行了仿真实验。实验结果显示,在随机系统参数下,相位高度的显函数模型仍然适用。根据系统参数,由光线追迹确定的像素、高度、相位数据符合相位

高度显函数模型。仿真结果验证了相位高度显函数模型的正确性和标定方法的有效性。在实际的结构光系统实现了本文提出的模型和标定方法,系统标定完毕后,对实际物体进行测量,所得的三维曲面具有较高的质量。对实际物体的实验结果进一步表明了本文提出方法的正确性和可行性。

参考文献:

- [1] CHEN F, BROWN G, SONG M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 10-22.
- [2] GORTHC S S, RASTOGI P. Fringe projection techniques: Whither we are? [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 133-140.
- [3] 刘江, 苗二龙, 曲艺, 等. 基于光强自标定移相算法检测光学面形[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2007-2013.
- LIU J, MIAO E L, QU Y, *et al.*. Measurement of optical surface based on intensity self-calibration phase-shift algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2007-2013. (in Chinese)
- [4] 武迎春, 曹益平, 肖焱山. 任意相移最小二乘法迭代的在线三维检测[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5): 1347-1353.
- WU Y CH, CAO Y P, XIAO Y SH. On-line three-dimensional inspection using randomly phase-shifting fringe based on least-square iteration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1347-1353. (in Chinese)
- [5] SRINIVASAN V, LIU H C, HALIOUA M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [6] ZHANG S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 149-158.
- [7] 黄昊, 达飞鹏. 小波变换轮廓术中快速相位展开方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(2): 397-404.
- HUANG H, DA F P. Novel phase unwrapping method for wavelet profilometry [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(2): 397-404. (in Chinese)
- [8] ZHOU W S, SU X Y. A direct mapping algorithm for phase-measuring profilometry [J]. *Journal of Modern Optics*, 1994, 41: 89-94.
- [9] ASUNDI A, ZHOU W. Unified calibration technique and its applications in optical triangular profilometry [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(16): 3556-3561.
- [10] XIAO Y S, CAO Y P, WU Y C. Improved algorithm for phase-to-height mapping in phase measuring profilometry [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(8): 1149-1155.
- [11] GUO H, HE H, YU Y, *et al.* Least-squares calibration method for fringe projection profilometry [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44: 033603-033603.
- [12] TAVARES P J, VAZ M A. Linear calibration procedure for the phase-to-height relationship in phase measurement profilometry [J]. *Optics communications*, 2007, 274(2): 307-314.
- [13] WEN Y F, LI S K, CHENG H B, *et al.*. Universal calculation formula and calibration method in Fourier transform profilometry [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(34): 6563-6569.
- [14] 于冲, 郭红卫. 条纹投射系统深度标定中的数据处理算法分析[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(8): 1855-1863.
- YU CH, GUO H W. Analysis of data processing algorithms in depth calibration of fringe projection system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(8): 1855-1863. (in Chinese)
- [15] DU H, WANG Z Y. Three-dimensional shape measurement with an arbitrarily arranged fringe projection profilometry system [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(16): 2438-2440.
- [16] CUI S C, ZHU X. A generalized reference-plane-based calibration method in optical triangular profilometry [J]. *Optics Express*, 2009, 17(23): 20735-20746.
- [17] VO M, WANG Z, HOANG T, *et al.*. Flexible calibration technique for fringe-projection-based

- three-dimensional imaging [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(19):3192-3194.
- [18] HUANG L, CHUA P S K, ASUNDI A. Least-squares calibration method for fringe projection profilometry considering camera lens distortion [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(9):1539-1548.
- [19] MA S D, ZHU R, QUAN C, *et al.*. Flexible structured-light-based three-dimensional profile reconstruction method considering lens projection-imaging distortion[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(13):2419-2428.
- [20] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11):1330-1334.
- [21] 张旭,朱利民,屠大维,等. 基于健壮中国剩余定理的频率选择准则及其在相位解卷绕中的应用[J]. *中国激光*, 2012, 39(11),1108009.
ZHANG XU, ZHU LIMIN. TU DAWEI, *et al.*. Frequency Selection Rule based Robust Chinese Remainder Theorem and its Application in Phase Unwrapping [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(11), 1108009. (in Chinese)
- [22] ZHANG X, ZHU L M. Projector calibration from the camera image point of view [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(11):117208.
- [23] 张旭,朱利民. Gamma 畸变的相位误差模型与 Gamma 标定技术[J]. *光学学报*, 2012, 32(4) 0412006.
ZHANG X, ZHU L M. Phase error model from Gamma distortion and Gamma calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412006. (in Chinese)
- [24] ZHANG X, ZHU L M, LI Y F, *et al.*. Generic non-sinusoidal fringe model and Gamma calibration in phase measuring profilometry[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, 29(6): 1047-1058.

作者简介:



张旭(1982—),男,副教授,2005年于东北大学获得学士学位,2011年于上海交通大学获得博士学位,主要研究方向为深度信息获取和计算机视觉。
E-mail: xuzhang@shu.edu.cn



李祥(1989—),男,安徽合肥人,硕士研究生,2012年于安徽科技学院获得学士学位,主要从事机器视觉方面的研究。E-mail:353361416@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)