

文章编号 1004-924X(2015)增-0239-08

数字投影三维测量系统纵向标定的改进

郑 鹏*, 张琳娜, 吴建权, 贾英锋

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 基于投影测量原理及现有的标定技术提出了一种改进的纵向标定方法。分析了测量系统在任意几何设置下参考平面与成像面之间的坐标转换关系, 构建了相位差-高度之间的映射数学模型, 并给出具体的测量系统逆向标定操作过程。该标定几何模型放宽了对投影及摄像系统方位设置的限制条件, 标定操作只需确定测量系统的数个待定参数, 各参数与成像面上的像素点坐标值不相关, 克服了原标定方法中对每个像素点进行繁琐的参数标定过程, 从而有效减少了计算的复杂程度, 降低了标定参数存储的空间。基于构建的数字投影光学三维测量系统, 分别采用两种标定方法对系统进行了标定实验和实测对比, 并分析了测量系统误差。结果表明: 基于新标定方法测得的平板面形 PV 值小于原标定方法测得值, 在 Z 向 0~48 mm, 测得不同位置 PV 值的标准差为 0.003 6 mm, 验证了改进方法的可行性。研究成果对于提高数字投影光学三维测量系统的标定效率和可操作性具有积极意义。

关键词: 光学测量; 三维测量; 数字投影; 纵向标定

中图分类号: TP391; TP306 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0239

Improvement of depth calibration for digital projection 3D measurement system

ZHENG Peng*, ZHANG Lin-na, WU Jian-quan, JIA Ying-feng

(*Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China*)

* *Corresponding author, E-mail: zpzuzut7631@163.com*

Abstract: On the basis of measuring principle and existing calibration technology, an improved depth calibration method was presented. After analysis of the coordinate transforming relation between reference plane and imaging plane of an ordinary geometry setting system, the mapping relation between the depth and the phase difference was established. Then, the reverse calibration process was given. The position restriction of a projection system and an imaging system was relaxed by the new calibration model. In the calibration process, calibration parameters were irrelevant to pixel coordinate values, so every pixel did not need its calibration parameters. Compared with the original method, the new method greatly reduces the calculative complexity and storage space of calibration parameters. Two calibration methods were used to calibrate the measurement system respectively. Then, a flat object was measured by different calibration systems, the results were compared and measuring errors were analyzed. The results show that the measured PV value of the object with the new method is

收稿日期: 2015-06-08; 修订日期: 2015-06-28.

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究计划资助项目(No. 142300410081); 郑州大学优秀青年教师发展基金资助项目(No. 1421321075)

smaller than that of the original method. In the Z direction (0 to 48 mm), the standard deviation of PV values is 0.003 6 mm, which verifies the validity of the improved method. This research has positive significance on enhancing calibration efficiency and operability for digital projection measurement systems.

Key words: optical measurement; three dimensional measurement; digital projection; depth calibration

1 引言

基于结构光的投影测量技术因具有测量速度快、精度高、全场等优点,而在工业产品检测、逆向工程、虚拟现实等领域中得到了广泛应用^[1]。结构光投影测量是利用图像传感器获取二维图像,并根据图像点的坐标与物体表面点的三维坐标之间的映射关系实现测量的。目前,结构光投影测量多采用可编码的条纹投射器,如数字投影仪(Digital Light Projector, DLP)作为光源,通过计算机生成标准周期性正弦条纹,将它投射到被测物上,数字条纹受物体表面的高度分布不同被调制为变形条纹图,通过 CCD 捕捉条纹图像,并利用相移法解调其相位,得到物体的相位差分布,最后通过系统标定的映射关系转化为物体面形的三维坐标。

数字投影测量系统标定技术的优劣直接影响测量精度,因此,如何实现高效率、高精度的系统标定一直是光学三维测量领域的研究热点。传统的标定方法多采用显示标定法,该方法需要标定系统的几何参数,对投影系统及 CCD 成像系统的光轴、参考平面有严格的相交、共面、平行、垂直等位置度要求。所构建的数学模型为复杂的非线性函数,标定过程复杂。近年来,不少研究者探寻光学三维测量系统新的标定算法和标定策略,以减少系统几何设置的约束程度^[2-7]。Zhou 等^[8]提出了一种摄像机与投影仪光轴不共面情况下相位与高度之间的关系表达式。Tavares 等^[9]提出了一种简化的线性标定方法,该方法计算简单,但其模型仍是基于传统的相交光轴系统建立的。毛先富等^[10]提出投影仪与摄像机双瞳连线与参考平面非平行时相位与高度之间的关系,放宽了系统的几何设置要求。郭红卫等^[11-12]提出了一种最小二乘标定法,纵向标定参数为每个像素点对应两个参数。该方法具有较高的标定精度,但参数的计算量大,标定过程较为耗时。

本文基于对数字投影三维测量技术和现有系统标定方法的研究,提出了系统纵向标定的改进方法,即相位差-高度映射关系的逆向标定方法。详细分析并构建了任意几何设置下的标定数学模型,给出了具体的测量系统参数的标定新策略。与原有的系统标定方法相比,该方法具有操作简单、参数暂用存储空间小、实用性强等优点。

2 数字投影三维测量系统及几何分析

构建的数字投影三维测量系统如图 1 所示,系统主要由投影仪(DLP)、摄像机(CCD)、精密移动工作台、计算机、辅助设备等组成。

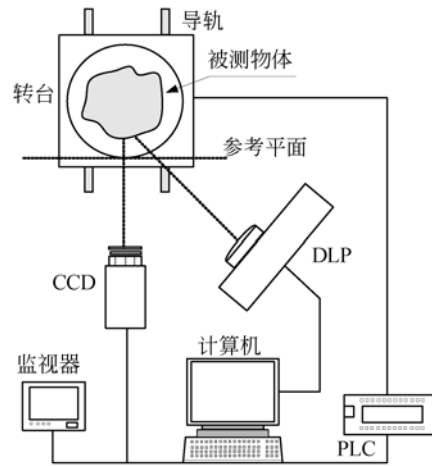


图 1 数字投影三维测量系统图

Fig. 1 Digital projection 3D measurement system

测量系统采用计算机模拟生成相移量为 $\alpha_n = 2\pi n/N$ 的 N 个标准正弦数字条纹,利用 DLP 将它们投影到被测物面上,CCD 成像面上得到的第 n 个条纹图像表示为:

$$I_n(i, j) = A(i, j) + B(i, j)\cos[\varphi(i, j) + \alpha_n], \quad (1)$$

其中: $I_n(i, j)$ 为记录到的光强分布; $A(i, j)$ 为背景光强; $B(i, j)$ 为调制度; $\varphi(i, j)$ 为条纹相位,它包含了物体的高度信息。计算包裹相位为:

$$\varphi(i, j) = -\arctan\left(\frac{\sum_{k=0}^{N-1} I_k \sin \alpha_k}{\sum_{k=0}^{N-1} I_k \cos \alpha_k}\right). \quad (2)$$

通过解包裹操作可以恢复实际的绝对相位。

测量时通常将参考平面作为基准,因此物体表面的高度信息是相对于参考平面而言的。令 φ_r 和 φ_0 分别为参考平面和物面的绝对相位,相位差定义为:

$$\Delta\varphi(i, j) = \varphi_0(i, j) - \varphi_r(i, j). \quad (3)$$

被测物面的高度信息与相位差具有一一对应的映射关系。

数字投影测量系统的几何关系如图 2 所示,点 C 为 CCD 摄像系统的中心点, P 为 DLP 的中心点。构建空间坐标系 O-XYZ,参考平面位于 XOY 平面内,其 Z 坐标轴通过 C 点。构建空间坐标系 O-X'Y'Z',理想平面 X'OY' 与 DLP 中心线垂直,DLP 投射标准正弦数字条纹(节距为 p)到理想平面上。坐标系 O-XYZ 通过分别沿 X 轴、Y 轴、Z 轴旋转 α, β, γ 角度,可以变换到坐标系 O-X'Y'Z'。

假设被测物面上一点 B 距离参考平面 h。BC 连线与参考平面的交点为 A 点, A 点与 B 点在

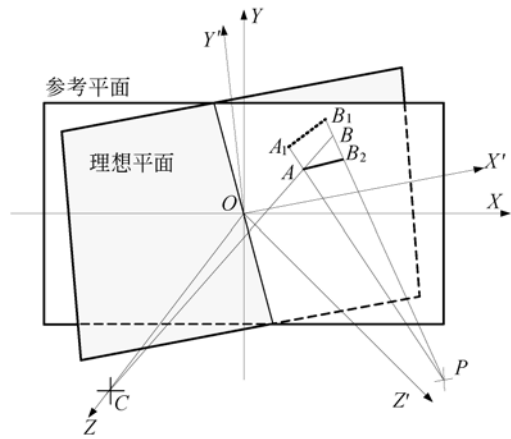


图 2 测量系统几何设置

Fig. 2 Geometry setting of measurement system

CCD 成像面上重叠。数字条纹投影到参考平面上时, A 点相位为 φ_A , 物面 B 点的相位为 φ_B , 两者的相位差为 $\Delta\varphi = \varphi_B - \varphi_A$ 。P 点在 O-X'Y'Z' 坐标系中的坐标为 (x'_p, y'_p, z'_p) , A 点与 C 点在 O-XYZ 中的坐标分别为 (x_A, y_A, z_A) 及 (x_C, y_C, z_C) 。则有相位差 $\Delta\varphi$ 与高度 h 的关系为^[11]:

$$\Delta\varphi = \frac{\eta h}{1 + \xi h}, \quad (4)$$

式中:

$$\eta = 2\pi z'_p \{ z'_p [x_A \cos \beta \cos \gamma + y_A (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma) - z_C (-\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma)] + x'_p (-x_A \sin \beta + y_A \sin \alpha \cos \beta + z_C \cos \alpha \cos \beta) + z_C [x_A (-\cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma) - y_A \cos \beta \sin \gamma] \} / [p z_C (x_A \sin \beta - y_A \sin \alpha \cos \beta - z'_p)^2], \quad (5)$$

$$\xi = \frac{x_A \sin \beta - y_A \sin \alpha \cos \beta - z_C \cos \alpha \cos \beta}{z_C (x_A \sin \beta - y_A \sin \alpha \cos \beta - z'_p)}. \quad (6)$$

对于变形条纹图中的单个像素点 (i, j) , 式(4)可以表示为:

$$\Delta\varphi(i, j) = \frac{\eta(i, j)h(i, j)}{1 + \xi(i, j)h(i, j)}. \quad (7)$$

可见,高度与相位差之间为非线性关系,对于固定的测量系统几何设置,需要逐一计算各个像素点对应的 $\eta(i, j)$ 及 $\xi(i, j)$, 获得 $\eta(i, j)$ 及 $\xi(i, j)$ 两个面阵数据,将该数据保存于系统中。测得物面的相位差分布后,通过式(7)即可计算出各个像素点所对应物面的高度值。由于现有的标定方法需要确定每个像素点对应的 η 和 ξ 参数。因此,标定过程参数计算量大、耗时,需占用较大的变量存储空间,并且相位差分布转换为物面高度分布的计算效率偏低。

3 改进的测量系统纵向标定数学模型

当测量系统中 CCD 成像平面与参考平面满足垂直关系时,根据针孔成像原理,参考平面上的 A 点在 O-XYZ 坐标系中的坐标与 CCD 成像面上对应点的关系为:

$$\begin{cases} x_A = (i_A - m)tL/f \\ y_A = (j_A - m)tL/f, \\ z_A = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: m 为 CCD 对角线像素个数的 1/2, t 为像素的边长, L 为摄像机镜头光心到 OXY 平面的距离, f 为镜头焦距。

在实际设置时,通常很难保证成像系统入瞳中心线与参考平面的垂直关系。为此,以式(8)为基础建立任意几何设置下参考平面上点与 CCD

成像面像素点的坐标转换关系。

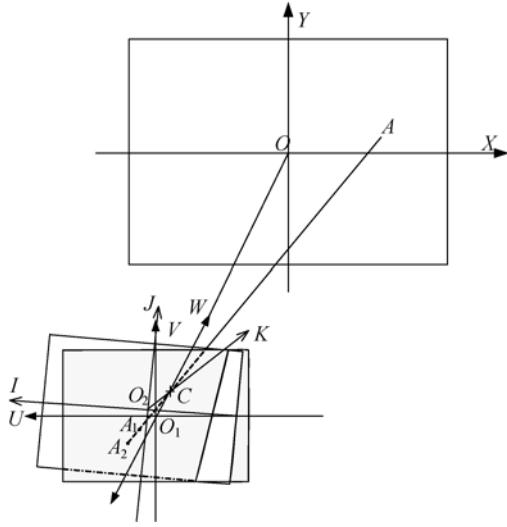


图 3 任意几何设置下的 CCD 成像示意图

Fig. 3 CCD image of ordinary geometry setting

图 3 给出了任意几何设置下 CCD 成像的示意图, C 点为 CCD 摄像系统的中心点, 参考面上

$$R_{\theta_u} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_u & \sin \theta_u \\ 0 & -\sin \theta_u & \cos \theta_u \end{bmatrix}, R_{\theta_v} = \begin{bmatrix} \cos \theta_v & 0 & -\sin \theta_v \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_v & 0 & \cos \theta_v \end{bmatrix}, R_{\theta_w} = \begin{bmatrix} \cos \theta_w & \sin \theta_w & 0 \\ -\sin \theta_w & \cos \theta_w & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

O_2 -UVW 坐标系与 O -XYZ 坐标系各轴平行, 两坐标系各轴单位分别为像素和长度, 则 A 点在 O_2 -UVW 坐标系中的坐标为:

$$(u_A, v_A, w_A) = \text{ROUND}\left(\frac{-x_A}{t}, \frac{y_A}{t}, L+f\right), \quad (10)$$

式中: ROUND() 为取整函数。

在 O_2 -UVW 坐标系内, $A_1 A$ 直线方程为:

$$\frac{u-u_A}{u_{A_1}-u_A} = \frac{v-v_A}{v_{A_1}-v_A} = \frac{w-w_A}{w_{A_1}-w_A}. \quad (11)$$

因为 A_2 点也在 $A_1 A$ 直线上, 将 $w_{A_2} = 0$ 及 A 点坐标分别代入式 (11), 得到 A_2 点在 O_2 -UVW 坐标系中的坐标为:

$$u_{A_2} = -\frac{(L+f) \times (u_{A_1} + \frac{x_A}{t})}{w_{A_1} - (L+f)} - \frac{x_A}{t}, \quad (12)$$

$$v_{A_2} = -\frac{(L+f) \times (v_{A_1} - \frac{y_A}{t})}{v_{A_1} - (L+f)} + \frac{y_A}{t}. \quad (13)$$

将 A_2 点坐标代入到式 (8) 中, 可得到:

A 点在 CCD 成像面 O_1 -IJK 上对应点为 A_1 点, $A_1 A$ 所在直线通过 C 点。构建一个假设成像平面 O_2 -UVW, 该假设成像系统的中心点与 C 点重合, 成像面与参考平面平行, 两个成像系统的配置参数相同。A 点在 O_2 -UVW 中的对应点为 A_2 , A_2 点与 A 点的坐标关系满足式 (8)。根据针孔成像原理, A_2 点在 $A_1 C$ 所在的直线上, 即 A, A_1 , A_2 3 点共线。A 点在 XOY 中的坐标为 (x_A, y_A) , A_1 在 $IO_1 J$ 中的坐标为 (i_{A_1}, j_{A_1}) , A_2 在 $UO_2 V$ 中的坐标为 (u_{A_2}, v_{A_2}) 。

O_2 -UVW 坐标系经过旋转和平移可以转换到 O_1 -IJK 坐标系。绕 U, V, W 轴的旋转量分别为 $\theta_u, \theta_v, \theta_w$, O_1 在 O_2 -UVW 的坐标为 $(u_{O_1}, v_{O_1}, w_{O_1})$ 。则 A_1 点在 O_2 -UVW 坐标系中的坐标可表示为:

$$(u_{A_1}, v_{A_1}, w_{A_1}) = (i_{A_1}, j_{A_1}, k_{A_1}) R_{\theta_u} R_{\theta_v} R_{\theta_w} + (u_{O_1}, v_{O_1}, w_{O_1}), \quad (9)$$

式中:

$$x_A = \left(-\frac{(L+f) \times (u_{A_1} + \frac{x_A}{t})}{w_{A_1} - (L+f)} - \frac{x_A}{t} - m\right) tL/f, \quad (14)$$

$$y_A = -\left(-\frac{(L+f) \times (v_{A_1} - \frac{y_A}{t})}{w_{A_1} - (L+f)} + \frac{y_A}{t} - m\right) tL/f. \quad (15)$$

将式 (9) 中的 A_1 点坐标代入式 (14)、式 (15), 可得到:

$$x_A = -\frac{r_1 i_{A_1} + r_2 j_{A_1} + s_1}{e_3 i_{A_1} + e_4 j_{A_1} + e_5}, \quad (16)$$

$$y_A = \frac{e_1 i_{A_1} + e_2 j_{A_1} + s_2}{e_3 i_{A_1} + e_4 j_{A_1} + e_5}, \quad (17)$$

式中:

$$r_1 = t[(L+f)\cos\theta_w\cos\theta_v - m\sin\theta_v],$$

$$r_2 = t[(L+f)(\sin\theta_u\sin\theta_v\cos\theta_w - \cos\theta_u\sin\theta_w) + r\sin\theta_u\cos\theta_v],$$

$$s_1 = t[(L+f)u_{O_1} + m(w_{O_1} - L - f)],$$

$$s_2 = t[(L+f)v_{O_1} + m(w_{O_1} - L - f)],$$

$$e_1 = t[(L+f)\cos\theta_w\sin\theta_v - m\sin\theta_v],$$

$$e_2 = t[(L+f)(\sin \theta_u \sin \theta_v \sin \theta_w + \cos \theta_u \cos \theta_w) + m \sin \theta_u \cos \theta_v],$$

$$e_3 = -(f/L+1) \sin \theta_v,$$

$$e_4 = (f/L+1) \sin \theta_u \cos \theta_v,$$

$$e_5 = (f/L+1)(\omega_{v_1} - L - f) + L + f.$$

将式(14)、式(15)分别代入式(5)可得:

$$\eta =$$

$$2\pi z_p \frac{K_{10} i^2 + K_{20} j^2 + K_{30} ij + K_{40} i + K_{50} j + K_{60}}{pz_c (H_{10} i + H_{20} j + H_{30})^2}. \quad (18)$$

式中: $K_{10} = Ae_3$, $K_{20} = Be_4$, $K_{30} = Ae_4 + Be_3$, $K_{40} = Ae_5 + Ce_3$, $K_{50} = Be_5 + Ce_4$, $K_{60} = Ce_5$, $H_{10} = r_1 \sin \beta + r_1 \sin \alpha \sin \beta + z_p e_3$, $H_{20} = r_2 \sin \beta + r_2 \sin \alpha \sin \beta + z_p e_4$, $H_{30} = s_1 \sin \beta + s_2 \sin \alpha \sin \beta + z_p e_5$;

$A = [z_p'(\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma) + x_p' \sin \alpha \cos \beta - z_c \cos \beta \sin \gamma] \times e_1 - [z_p' \cos \beta \cos \gamma - x_p' \sin \beta + z_c(-\cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma)] \times r_1 + z_c[z_p'(\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma) + x_p' \cos \alpha \cos \beta] \times e_3$

$B = [z_p'(\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma) + x_p' \sin \alpha \cos \beta - z_c \cos \beta \sin \gamma] \times e_2 - [z_p' \cos \beta \cos \gamma - x_p' \sin \beta + z_c(-\cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma)] \times r_2 + z_c[z_p'(\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma) + x_p' \cos \alpha \cos \beta] \times e_4$

$C = [z_p'(\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma) + x_p' \sin \alpha \cos \beta - z_c \cos \beta \sin \gamma] \times s_2 - [z_p' \cos \beta \cos \gamma - x_p' \sin \beta + z_c(-\cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma)] \times s_1 + z_c[z_p'(\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma) + x_p' \cos \alpha \cos \beta] \times e_5$

$$\Delta \varphi(i, j) = \frac{(K_1 i^2 + K_2 j^2 + K_3 ij + K_4 i + K_5 j + K_6) h(i, j)}{(H_1 i + H_2 j + 1)^2 + (P_1 i^2 + P_2 j^2 + P_3 ij + P_4 i + P_5 j + P_6) h(i, j)}, \quad (22)$$

式中: $P_1 = Q_1 H_1$, $P_2 = Q_2 H_2$, $P_3 = Q_1 H_2 + Q_2 H_1$, $P_4 = Q_1 + Q_3 H_1$, $P_5 = Q_2 + Q_3 H_2$, $P_6 = Q_3$ 。

可见,上式中的系数($K_1 \sim K_6$, $H_1, H_2, P_1 \sim P_6$)即为测量系统的待定参数。对于确定的系统,只要通过变形条纹图获得物面的相位差分布,即可求得物面在空间坐标中的高度分布。与高度标定对比,纵向标定大大减少了系统标定参数的存储,即不需要对每个像素点计算相应参数。

4 测量系统纵向标定过程

基于上述推导的系统纵向标定参数模型,为

令 $K_1 = 2\pi z_p' K_{10} / (pz_c H_{30}^2)$, $K_2 = 2\pi z_p' K_{20} / (pz_c H_{30}^2)$, $K_3 = 2\pi z_p' K_{30} / (pz_c H_{30}^2)$, $K_4 = 2\pi z_p' K_{40} / (pz_c H_{30}^2)$, $K_5 = 2\pi z_p' K_{50} / (pz_c H_{30}^2)$, $K_6 = 2\pi z_p' K_{60} / (pz_c H_{30}^2)$, $H_1 = H_{10} / H_{30}$, $H_2 = H_{20} / H_{30}$ 。则式(18)可以简化为:

$$\eta = \frac{K_1 i^2 + K_2 j^2 + K_3 ij + K_4 i + K_5 j + K_6}{(H_1 i + H_2 j + 1)^2}. \quad (19)$$

同理,将式(14)、式(15)中分别代入式(6)计算 ξ 。

$$\xi = \frac{1}{z_c} \frac{Q_{10} i + Q_{20} j + Q_{30}}{H_{10} i + H_{20} j + H_{30}}, \quad (20)$$

式中: $Q_{10} = r_1 \sin \beta + r_1 \sin \alpha \sin \beta + e_3 \cos \alpha \cos \beta$, $Q_{20} = r_2 \sin \beta + r_1 \sin \alpha \sin \beta + e_4 \cos \alpha \cos \beta$, $Q_{30} = s_1 \sin \beta + s_2 \sin \alpha \sin \beta + e_5 \cos \alpha \cos \beta$ 。

令 $Q_1 = Q_{10} / (z_c H_{30})$, $Q_2 = Q_{20} / (z_c H_{30})$, $Q_3 = Q_{30} / (z_c H_{30})$, 则式(20)可以简化为:

$$\xi = \frac{Q_1 i + Q_2 j + Q_3}{H_1 i + H_2 j + H_3}. \quad (21)$$

将式(19)、式(21)代入式(7),可得到高度与相位差之间的关系为:

$$\Delta \varphi(i, j) = \frac{K_1 i^2 + K_2 j^2 + K_3 ij + K_4 i + K_5 j + K_6}{(H_1 i + H_2 j + 1)^2} h(i, j) \frac{1}{1 + \frac{Q_1 i + Q_2 j + Q_3}{H_1 i + H_2 j + 1} h(i, j)}. \quad (22)$$

进一步简化为:

$$\Delta \varphi(i, j) = \frac{(K_1 i^2 + K_2 j^2 + K_3 ij + K_4 i + K_5 j + K_6) h(i, j)}{(H_1 i + H_2 j + 1)^2 + (P_1 i^2 + P_2 j^2 + P_3 ij + P_4 i + P_5 j + P_6) h(i, j)}, \quad (23)$$

准确获得各待定参数,可以利用逆向标定的方法来实现。测量系统的标定需要配置一块标准的平面标定板,标定原理如图 4 所示,等间距平行移动标定板,并测量不同位置的面形分布,提取若干点的相位信息,采用标定参数模型计算各待定参数。具体标定步骤如下:

(1) 将标定板安装在精密工作台上,并设定标定平板的初始位置 Z_0 为零位置(参考平面)。DLP 投射相移数字条纹,通过 CCD 成像系统获取标定平板的变形条纹,对该条纹图像进行绝对相位的求解,并将该相位分布作为参考相位 φ_r 。

(2) 控制精密工作台按设定值将标定板移动

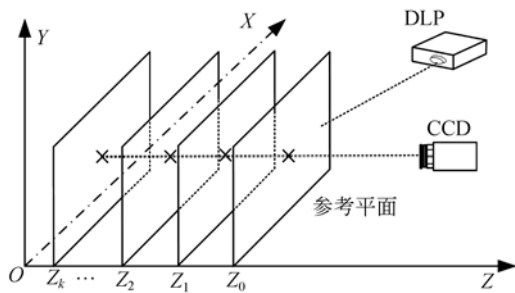


图 4 纵向标定示意图

Fig. 4 Diagram of depth calibration

至另一位置 Z_1 , 已知 Z_0 与 Z_1 之间的距离。重复上一步操作, 对该位置处的标定平板进行测量, 获得该位置处的相位 φ_0 , 则相位差为 $\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi_1$ 。逐一平移标定板到位置 $Z_k (k \geq 2)$, 并分别进行测量, 得到各位置处标定板的相位差分布。

(3) 提取成像面内的部分像素点的测量信息, 包括像素坐标值 (i, j) 、对应的相位差 $\Delta\varphi(i, j)$ 、 Z 向所处的位置 (即纵向高度值)。将这些数据分别代入式 (23) 构建超定方程组, 并利用最小二乘法进行求解, 从而得到测量系统的纵向标定参数值 $(K_1 \sim K_6, H_1, H_2, P_1 \sim P_6)$ 。

5 测量系统标定实验与误差分析

5.1 测量系统标定实验

数字投影三维测量系统如图 1 所示, 测量标定板为黑白格相间标准平板, 可以同时进行纵向和横向标定。通过 DLP 投射相移条纹到标定板, CCD 获取的条纹如图 5 所示。采用上述的纵向标定步骤, 以当前标定板为参考平面, 并沿 Z 轴分别移动标定板至 15, 30, 45 mm 位置处, 进行条纹投影测量。采用相移法获得 4 个位置处标定平板的绝对相位, 并获得后 3 个位置处的相位差分布。然后, 提取标定板白色方格内的像素点信息, 计算系统的纵向标定参数值 $(K_1 \sim K_6, H_1, H_2, P_1 \sim P_6)$ 。

由于标定板中黑白格的几何尺寸是确定的, 通过角点检测方法获得特征角点在图像中的坐标值, 从而确定空间横向坐标与像素之间的对应关系, 实现横向标定, 具体过程不再详述。

为验证系统标定的正确性, 对一平板进行测量, 被测平板如图 6 所示, 分别采用两种纵向标定方法对系统进行标定。

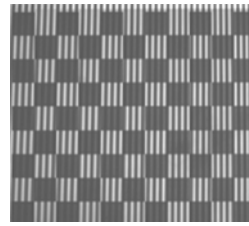


图 5 标定板

Fig. 5 Calibration board



图 6 被测平板

Fig. 6 Tested board

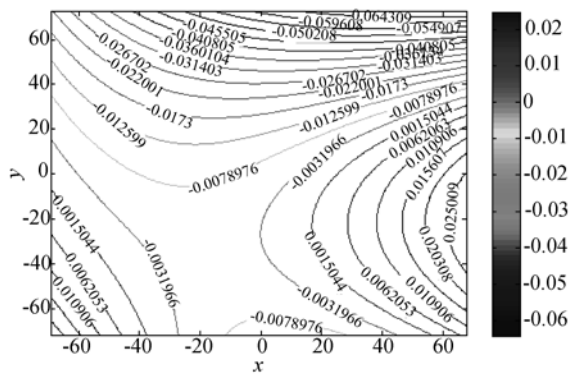


图 7 新标定方法下测得的平板等高图

Fig. 7 Contour map of tested flat based on new calibration method

用原标定方法标定系统后, 测得的平板的 PV (峰谷) 值为 0.099 5 mm, RMS (均方根) 值为 0.018 4 mm; 图 7 所示为采用新标定方法对系统标定后, 测得的平板面形等高图, 其 PV 值为 0.094 7 mm, RMS 值为 0.017 9 mm, 两种标定方法测量的平板 PV 值相差 0.004 8 mm。

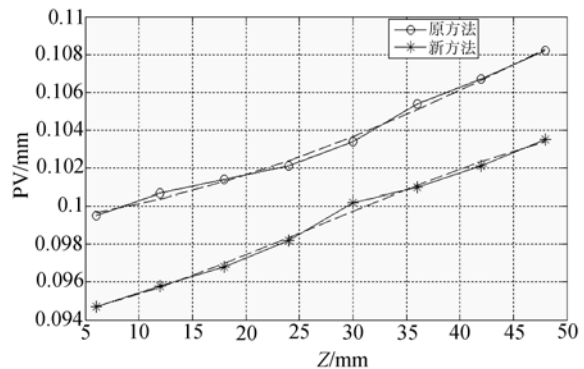


图 8 测得平板不同位置处的 PV 值

Fig. 8 Measured PV values of flat at different positions

重复以上测量步骤, 沿 Z 轴方向对平板进行等间距测量 (间隔为 6 mm), 测得平板 8 个位置处的 PV 值, 如图 8 所示。由图中数据可知, 采用

新标定方法测得的 PV 值始终小于原标定方法的测得值,原标定方法测得的不同位置处 PV 值的标准偏差为 0.005 3 mm,新标定方法的测得值为 0.004 5 mm。以上实验结果验证了新标定方法的有效性。对比两种标定操作过程可知,新方法的标定效率、可操作性具有明显的优势。

5.2 测量系统误差分析与补偿

测量系统的纵向标定是通过相位差-高度之间的映射数学模型实现的,因此,准确测得相位是提高测量系统精度的关键。在实际测量中相位误差主要包括相移误差、图像噪声、CCD 镜头畸变、DLP 的 Gamma 非线性等。由于采用计算机生成标准正弦相移数字条纹,所以相移误差可以忽略。由于单幅条纹图像均为 CCD 采集多幅图像的平均输出,同时,又采用高斯滤波方法对图像进行了预处理,所以可以有效抑制随机噪声。对于 CCD 镜头畸变引起的误差,系统基于直接线性变换法模型,根据特征角点数据,采用 BP 神经网络的修正方法对标定参考平面的横向坐标进行了修正^[13]。DLP 存在的 Gamma 非线性将引入高阶谐波,导致投影正弦条纹发生畸变。为解决该问题,利用光强直方图匹配原理确定非线性曲线,估计真实 Gamma 值,从而进行自适应校正^[14]。

通过抑制及校正上述各误差因素,为进一步消除测量系统标定后的系统误差,采用测量标准平面(白板面形误差约为 2λ ,取波长 $\lambda=560\text{ nm}$)的方法进行误差补偿。测量标准平面后,对其面形分布进行多项式拟合,可表示为式(24)。系统误差补偿可表示为式(25)。

$$z = f(c, x, y) = c_0 x^3 + c_1 y^3 + c_2 x^2 y + c_3 y^2 x + c_4 x^2 + c_5 y^2 + c_6 xy + c_7 x + c_8 y + c_9, \quad (24)$$

$$\tilde{Z} = Z - f(c, X, Y), \quad (25)$$

式中: c 表示 $c_0 \sim c_9$,为待定系数; (x, y, z) 为测得标准平面的三维坐标; \tilde{Z} 为补偿后的 Z 向坐标值; (X, Y, Z) 为实测物体的三维坐标。

对被测标准平面进行误差补偿后,其残差分布如图 9 所示,残差的标准偏差为 0.001 3 mm。

采用上述的测量系统误差补偿方法,对图 6 所示的平板进行测量。在 Z 轴方向 0~48 mm 测得不同位置处平板 PV 值的标准偏差由 0.004 5 mm 降低到 0.003 6 mm。

基于新标定方法和测量系统误差补偿方法,对一具有复杂面形特征的实物进行了三维测量,实物及测量结果如图 10 所示。测量得到的面形平滑光滑,满足精度要求。可见,采用新标定方法

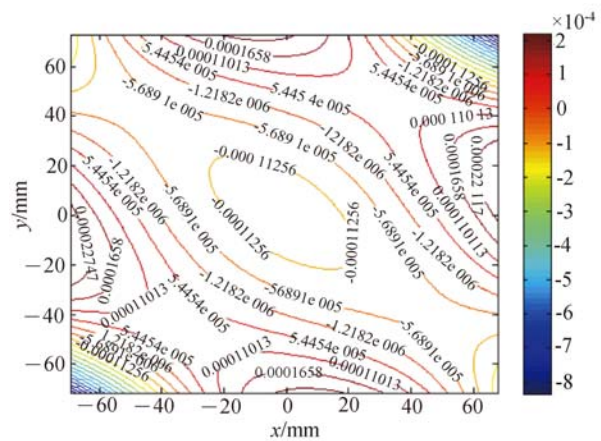


图 9 残差分布图

Fig. 9 Contour map of residual errors

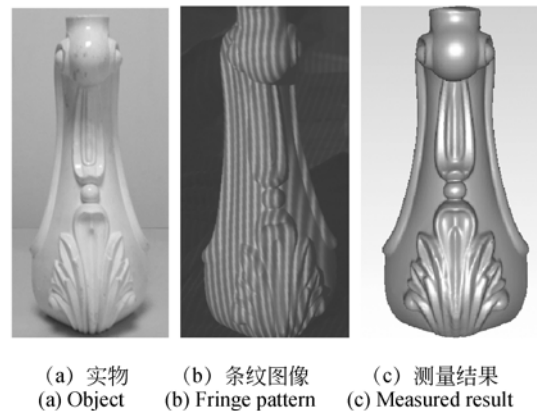


图 10 被测实物及三维测量结果

Fig. 10 Object and result of 3D measurement

的测量系统可以有效测量复杂面形,同时亦验证了测量系统误差补偿的可行性。

6 结 论

本文针对数字投影测量系统的纵向标定方法提出了改进策略。原方法标定过程计算复杂、耗时,标定参数是与各像素点一一对应的面阵分布,参数存储信息量大。本文构建了新的系统纵向标定几何模型,标定参数与像素点坐标不相关,是数个单一的参数变量。通过对标定板的移动测量,采用逆向标定的方法获取各参数变量。该方法很大程度上提高了系统纵向标定的效率,增强了可操作性。基于新标定方法测得的平板面形 PV 值小于原标定方法的测得值,在 Z 轴方向 0~48 mm 测得不同位置 PV 值的标准差为 0.003 6 mm,由此证明了该方法的可行性、有效性。本文

的研究成果为数字投影三维测量系统的纵向标定

提供了理论基础和技术支持。

参考文献:

- [1] 戴美玲, 杨福俊, 何小元. 基于双频彩色光栅投影测量不连续物体三维形貌[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(1): 8-12.
DAI M L, YANG F J, H X Y. Three-dimensional shape measurement of objects with discontinuities by dual-frequency color fringe projection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 8-12. (in Chinese)
- [2] 杨守瑞, 尹仕斌, 任永杰, 等. 机器人柔性视觉测量系统标定方法的改进[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(12): 3239-3246.
YANG SH R, YIN SH B, REN Y J, *et al.*. Improvement of calibration method for robotic flexible visual measurement systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3239-3246. (in Chinese)
- [3] 陈新禹, 马孜, 陈天飞. 线结构光传感器模型的简易标定[J]. 光学 精密工程, 2013, 20(11): 2345-2352.
CHEN X Y, MA Z, CHEN T F. Calibration model for line structured light vision sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 20(11): 2345-2352. (in Chinese)
- [4] FU Y J, WANG Y L, WANG W, *et al.*. Least-squares calibration method for fringe projection profilometry with some practical considerations [J]. *Optik*, 2013, 124(19): 4041-4045.
- [5] LI B W, ZHANG S. Structured light system calibration method with optimal fringe angle [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(33): 7942-7950.
- [6] XIAO Y L, XUE J P, SU X Y. Robust self-calibration three-dimensional shape measurement in fringe-projection photogrammetry [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 694-696.
- [7] ANCHINI R, DILEO G, LIGUORI C. A new calibration procedure for 3-D shape measurement system based on phase-shifting projected fringe profilometry[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(5): 1291-1298.
- [8] ZHOU W, SU X Y. A direct mapping algorithm for phase-measuring profilometry [J]. *Journal of Modern Optics*, 1994, 41(1): 89-94.
- [9] 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.
- [10] 毛先富, 陈文静, 苏显渝, 等. 傅里叶变换轮廓术中新的相位及高度算法分析[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 225-229.
MAO X F, CHEN W J, SU X Y, *et al.*. Analysis of new phase and height algorithm in Fourier transform profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 225-229. (in Chinese)
- [11] GUO H W, HE H T, YU Y J, *et al.*. Least-squares calibration method for fringe projection profilometry [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(3): 033603.
- [12] 于冲, 郭红卫. 条纹投射系统深度标定中的数据处理的算法分析[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)
- [13] 郑鹏. 面阵传感圆柱度非接触测量方法及评定技术研究[D]. 上海: 上海大学, 2009.
ZHENG P. *Non-contact Measurement and Evaluation of Cylindricity Based on Area-array Sensing Technique* [D]. Shanghai: Shanghai University, 2009. (in Chinese)
- [14] 郑鹏, 郭红卫, 赵展, 等. 数字条纹投射技术中改进的非线性校正方法[J]. 光学技术, 2009, 35(1): 13-17.
ZHENG P, GUO H W, ZHAO ZH, *et al.*. Improved nonlinearity correction method for digital fringe projection profilometry [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(1): 13-17. (in Chinese)

作者简介:



郑鹏(1976—),男,河南驻马店人,博士,副教授,2003年于郑州大学获得硕士学位,2009年于上海大学获得博士学位,主要研究方向为数字化计量、光学三维测量。E-mail: zpzzut7631@163.com



张琳娜(1957—),女,河北仓县人,教授,博士生导师,1989年于郑州大学获得硕士学位,主要研究方向为精度设计、计量测试。E-mail: zhanglinna@zzu.edu.cn