

基于位置敏感器件的视觉测量系统标定技术

滕玉坤^{1,2,3,4*}, 郝颖明^{1,2,3,4}, 付双飞^{1,3,4}, 范晓鹏^{1,2,3,4}

¹中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;

⁴辽宁省图像理解与视觉计算重点实验室, 辽宁 沈阳 110016

摘要 位置敏感器件(PSD)具有受光照影响小、数据处理简单的特点,在视觉位姿测量方面具有很大优势。但受PSD传感器自身非线性影响,其畸变复杂,PSD传感器的标定成为其应用的关键。针对PSD相机和红外发光二极管(LED)光源组成的PSD视觉测量系统,提出了一种PSD相机标定方法。该方法采用多项式模型表征PSD相机畸变,结合传统的针孔成像模型共同构成PSD相机成像模型;利用非线性优化标定相机模型参数;设计了专用的红外LED标定板,实现了PSD视觉测量系统的标定。实验结果表明:该方法对PSD相机的标定精度较高,利用该标定结果进行位姿测量的精度较高,速度较快,可以满足高精度光学测量的需求。

关键词 测量; 视觉测量; 相机标定; 位置敏感器件; 精度

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.081202

Calibration Technology of Visual Measurement System Based on Position Sensitive Detector

Teng Yukun^{1,2,3,4*}, Hao Yingming^{1,2,3,4}, Fu Shuangfei^{1,3,4}, Fan Xiaopeng^{1,2,3,4}

¹Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Key Laboratory of Opto-Electronic Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China;

⁴Key Lab of Image Understanding and Computer Vision, Liaoning Province, Shenyang, Liaoning 110016, China

Abstract Position sensitive detector (PSD) has a great advantage in terms of visual pose measurement due to less affect by light and the simple data processing. However, due to the non-linearity of the PSD sensor itself, the distortion of the PSD sensor is complex and the calibration of the PSD sensor becomes the key to its application. Aiming at the PSD vision measurement system composed of PSD camera and infrared light emitting diode (LED) light source, we propose a PSD camera calibration method. The method uses polynomial model to characterize the PSD camera distortion, combined with the traditional pinhole imaging model to form the PSD camera imaging model. Non-linear optimization is used to get calibration camera model parameters. A dedicated infrared LED calibration board is designed to achieve PSD vision measurement system calibration. Experimental results show that this method has high calibration accuracy for PSD camera. With this calibration result, we can obtain high measurement accuracy of position and orientation and short running time, which can meet the demand of high precision optical measurement.

Key words measurement; visual measurement; camera calibration; position sensitive detector; accuracy

OCIS codes 120.4820; 150.1488; 140.3300

收稿日期: 2018-02-11; 修回日期: 2018-03-08; 录用日期: 2018-03-14

* E-mail: tengyukun@sia.cn

1 引言

位置敏感器件(PSD)是一种对入射光点位置敏感的精密光电器件^[1-2],具有时间响应快、分辨率高和瞬态效应特性好等优点。基于 PSD 的视觉位姿测量不仅可以通过对光源的调制来减弱复杂光照条件的影响,还可以获得较快的处理速度,具有广阔的应用前景。但由于 PSD 传感器光敏面上阻性不均匀,导致 PSD 传感器的输出存在非线性,限制了 PSD 传感器的应用。虽然一些学者^[3-4]提出了改进型 PSD,但是非线性仍然不可避免。因此,PSD 相机的标定问题成为了基于 PSD 的视觉测量必须要解决的关键问题。目前,针对 PSD 传感器非线性的标定主要有激光直接照射 PSD 传感器进行标定以及将其与光学镜头一起进行标定两种方案。激光直接照射传感器的方法操作复杂,对实验设备的要求较高,标定精度依赖于运动平台的运动精度。在直接标定 PSD 传感器时,如果选用插值方法^[5],就会出现振荡;如果选择神经网络^[6]进行非线性分析,则稳健性差,网络收敛较慢。若要对 PSD 传感器和镜头同时进行标定,传统标定方法都不理想。如:Zhang^[7]和 Tsai^[8]的标定方法都是针对镜头畸变的,对 PSD 自身非线性畸变的标定并不理想。Du^[9]提出了一种基于切比雪夫多项式的对 PSD 和镜头同时标定的方案,该方案能够获得较高的精度,但模型运算量较大,在实际的位姿解算时难以满足实时性的要求。

本文针对 PSD 测量系统受到镜头畸变以及 PSD 非线性影响的特点,提出用多项式模型结合针孔成像模型共同描述 PSD 相机,采用非线性优化求解相机模型参数的 PSD 相机标定方法;为适应 PSD 相机的调制机制,设计并加工了专用 PSD 相机标定板,成功实现了 PSD 相机的高精度标定。实验结果表明:利用该相机模型进行标定,具有与切比雪夫多项式模型相近的标定精度;因参数较少,模型更简单,在位姿求解时,具有更快的处理速度。

2 基本原理

2.1 基于 PSD 的视觉测量系统

基于 PSD 的视觉测量系统一般由 PSD 相机和一个由多个点光源构成的合作标志器组成。合作标志器上的多个点光源可以布置成不同的构型,且已知各点光源在合作标志器坐标系下精确的三维坐标,只要能够通过 PSD 相机获得各点光源在相机坐标系下的图像坐标,即可通过透视 n 点定位(PNP)算法直接求

解标志器坐标系与 PSD 相机坐标系间的相对位置和姿态。PSD 相机由光学镜头、PSD 传感器和处理电路组成,能够直接输出各点光源在 PSD 传感器上的成像坐标 (u, v) 。PSD 相机一般没有现成的产品,需要根据需求专门研制,通常是与合作标志器中的点光源一起设计。为减弱环境光照的影响,点光源一般采用经过正弦波调制的红外发光二极管(LED),PSD 相机的处理电路需要针对红外 LED 灯的调制频率进行解调,从而得到不同频率调制的 LED 的光强,根据 LED 在 PSD 传感器 4 个电极上输出信号强度的不同,可以解算 LED 在 PSD 传感器靶面中的二维坐标。

PSD 传感器作为整个测量系统的核心部件,其基本结构为一 PIN 结构,工作原理基于横向光电效应^[10]。PSD 传感器的原理和等效电路如图 1 所示,其中,C 为电容器,R 为电阻,D 为理想二极管, I 为电流, U_{bb} 为负电极, X_A 为入射光点在光敏面上的 x 坐标。在片状本征半导体硅的表面通过掺杂工艺形成面状 PN 结,理想状态下光敏表面薄层的电阻是均匀的。当光斑照射在光敏面上时,穿过 PN 结的光电流通过 4 个电极输出。4 个电极输出的电流与光斑的位置呈线性关系。设光敏面的几何中心为 X - Y 坐标系的原点,4 个电极的输出电流分别为 I_{Y1} 、 I_{Y2} 、 I_{X3} 和 I_{X4} 。根据 PSD 输出电流计算其在光敏面上光点位置的方程为

$$\frac{(I_{X4} + I_{Y1}) - (I_{X3} + I_{Y2})}{I_{X4} + I_{Y1} + I_{X3} + I_{Y2}} = \frac{2X}{L}, \quad (1)$$

$$\frac{(I_{X4} + I_{Y2}) - (I_{X3} + I_{Y1})}{I_{X4} + I_{Y1} + I_{X3} + I_{Y2}} = \frac{2Y}{L}, \quad (2)$$

式中: L 为 PSD 传感器电极间的距离; X 、 Y 为入射光点在光敏面坐标系下的坐标。由此,入射光点在 PSD 传感器上的成像位置可以通过各个电极的输出电流计算获得。

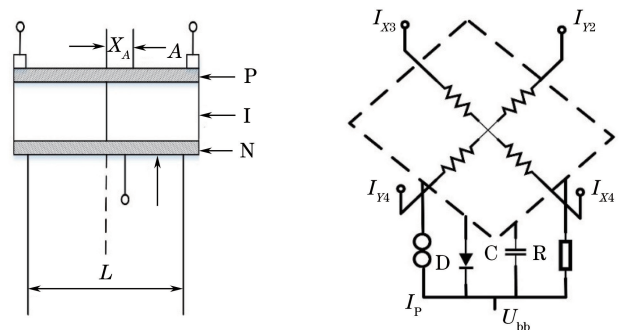


图 1 PSD 传感器的(a)原理图与(b)等效电路图

Fig. 1 (a) Schematic and (b) equivalent circuit of PSD sensor

2.2 PSD 相机的成像模型

在不考虑测量系统畸变的情况下,PSD 相机的

成像符合针孔成像模型^[11-12],如图2所示,其中世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 是与 PSD 相机固联的一个参考坐标系,即实际测量时使用的坐标系。摄像机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 原点在镜头投影中心(摄像机光心), Z_c 轴为摄像机主光轴。成像平面在摄像机投影中心前端 f 处,位于摄像机与检测平面之间, f 为摄像机的焦距。 O_1-uv 是以像素为单位的图像像素坐标系,坐标原点 O_1 定义在图像中心,横坐标为 u ,纵坐标为 v 。

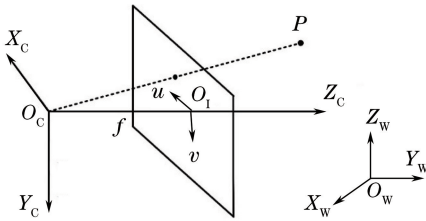


图2 相机成像模型

Fig. 2 Camera imaging model

设点 P 在三维世界坐标系下的齐次坐标为 $\mathbf{M}=[X_w Y_w Z_w 1]^T$,在相机坐标系下的坐标为 $\mathbf{M}_c=[X_c Y_c Z_c]^T$,在图像像素坐标系下的齐次坐标为 $\mathbf{m}=[u v 1]^T$,则点 P 在相机坐标系下的表达式为

$$\mathbf{M}_c = [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \mathbf{M}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{R} 为 3×3 旋转矩阵; \mathbf{T} 为 3×1 平移向量。从摄像机坐标系到像素坐标系的转换关系为

$$\begin{cases} t\mathbf{m} = \mathbf{A}\mathbf{M}_c \\ \mathbf{A} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (4)$$

式中: t 为比例因子; \mathbf{A} 为内参数矩阵; f_u 和 f_v 为焦距; u_0 和 v_0 为主点坐标。

归一化图像坐标可以表示为

$$\begin{cases} x = (u - u_0)/f_u = X_c/Z_c \\ y = (v - v_0)/f_v = Y_c/Z_c \end{cases} \quad (5)$$

以上为不考虑 PSD 相机畸变时的理想成像模型。对于一般的相机,由径向畸变、切向畸变构成的传统畸变模型已经能够很好地描述相机的畸变^[13],但是对于 PSD 相机来说,只考虑镜头畸变是不够的,由于 N 区材料的不均匀性、电极形状等因素造成 P 区结面上电阻率不均匀分布,从而导致了 PSD 传感器自身的非线性。因此,需要一种比传统畸变模型更复杂的模型来描述 PSD 相机的畸变,以满足高精度视觉测量的需要。受传统畸变模型和切比雪夫多项式模型^[9]的启发,这里采用基于多项式的畸变模型。定义

$$\varphi_{ij}(x, y) = x^{i-j} y^j, \quad (6)$$

则多项式畸变模型可以描述为

$$\begin{cases} \bar{x} = \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^i a_k \varphi_{ij}(x, y) = \\ a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 x^2 + a_5 xy + \\ a_6 y^2 + \dots + a_w x^N + \dots + a_{(N+1)(N+2)/2} y^N \\ \bar{y} = \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^i b_k \varphi_{ij}(x, y) = \\ b_1 + b_2 x + b_3 y + b_4 x^2 + b_5 xy + \\ b_6 y^2 + \dots + b_w x^N + \dots + b_{(N+1)(N+2)/2} y^N \end{cases}, \quad (7)$$

式中: \bar{x}, \bar{y} 为带有畸变的归一化图像坐标; x, y 为理想图像归一化坐标; a_k, b_k 为畸变系数, $k = 1, 2, 3, \dots, (N+1)(N+2)/2$; N 阶多项式对应 $(N+1) \cdot (N+2)$ 个畸变系数。则带畸变的图像像素坐标 \bar{u}, \bar{v} 为

$$\begin{cases} \bar{u} = f_u \bar{x} + u_0 \\ \bar{v} = f_v \bar{y} + v_0 \end{cases} \quad (8)$$

2.3 PSD 相机的标定

相机标定的目的是确定三维空间点与二维图像点之间的变换关系,即相机成像模型的具体参数值。PSD 相机的标定包括内参数标定和外参数标定两个步骤,内参数标定获得图像像素坐标系与相机坐标系间的关系,标定参数包括相机内参数 (f_u, f_v, u_0, v_0) 及描述畸变量的畸变参数 a_k 和 b_k , 其中 $k = 1, 2, \dots, (N+1)(N+2)/2$ 。外参数标定获得相机坐标系与世界坐标系之间的关系,标定参数包括相机旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{T} 。

采用优化方法标定相机内参数,其中最为关键的三步为:确定参数初始值、定义优化目标函数和选择优化方法。

确定相机内参数初始值时,假设相机没有畸变,采用参考文献[7]中的标定法对理想模型参数 ($f_u, f_v, u_0, v_0, \mathbf{R}_i, \mathbf{T}_i$) 的初始值进行估计。已知标定板坐标系下 d 个特征点的坐标 \mathbf{M}_j ,采集 n 组标定板图像数据,获得实际图像像素坐标 \mathbf{m}_{ij} ,设 $\hat{\mathbf{m}}_{ij}$ 为重投影计算得到的图像像素坐标。在获取理想模型的参数后,以 \mathbf{m}_{ij} 和 $\hat{\mathbf{m}}_{ij}$ 之间的最小距离来构建最小二乘目标函数,即对如下目标函数使用莱文贝格-马夸特(LM)算法进行非线性优化:

$$\gamma_{\min} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^d \|\mathbf{m}_{ij} - \hat{\mathbf{m}}_{ij}(\mathbf{A}, \mathbf{R}_i, \mathbf{T}_i, \mathbf{M}_j)\|. \quad (9)$$

通过以上计算来获得内参数的初值,并得到空间点在理想模型下的图像坐标。

对于多项式畸变模型,在计算时使用最小二乘

法来最小化残差平方和确定畸变系数 a 、 b 的初值。

即令

$$\begin{aligned} J_x &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^h (\mathbf{g}_{x,i} - \bar{x}_i)^2 = \\ &= \frac{1}{2} (\mathbf{g}_x - \mathbf{H}\mathbf{a})^T (\mathbf{g}_x - \mathbf{H}\mathbf{a}), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} J_y &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^h (\mathbf{g}_{y,i} - \bar{y}_i)^2 = \\ &= \frac{1}{2} (\mathbf{g}_y - \mathbf{H}\mathbf{b})^T (\mathbf{g}_y - \mathbf{H}\mathbf{b}), \end{aligned} \quad (11)$$

式中: \mathbf{g}_x 、 \mathbf{g}_y 为实际归一化图像坐标的列向量; \mathbf{H} 的定义为

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \phi_{00}(x_1, y_1) & \phi_{10}(x_1, y_1) & \phi_{11}(x_1, y_1) & \phi_{20}(x_1, y_1) & \cdots & \phi_{NN}(x_1, y_1) \\ \phi_{00}(x_2, y_2) & \phi_{10}(x_2, y_2) & \phi_{11}(x_2, y_2) & \phi_{20}(x_2, y_2) & \cdots & \phi_{NN}(x_2, y_2) \\ \phi_{00}(x_3, y_3) & \phi_{10}(x_3, y_3) & \phi_{11}(x_3, y_3) & \phi_{20}(x_3, y_3) & \cdots & \phi_{NN}(x_3, y_3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_{00}(x_h, y_h) & \phi_{10}(x_h, y_h) & \phi_{11}(x_h, y_h) & \phi_{20}(x_h, y_h) & \cdots & \phi_{NN}(x_h, y_h) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

为了使 J_x 和 J_y 最小, \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 应满足下列条件:

$$\nabla_{\mathbf{a}} J_x = \mathbf{H}^T \mathbf{H}\mathbf{a} - \mathbf{H}^T \mathbf{g}_x = 0, \quad (13)$$

$$\nabla_{\mathbf{b}} J_y = \mathbf{H}^T \mathbf{H}\mathbf{b} - \mathbf{H}^T \mathbf{g}_y = 0. \quad (14)$$

系数 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 的初值计算为

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{a}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{g}_x \\ \tilde{\mathbf{b}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{g}_y \end{cases}. \quad (15)$$

综上,可以得到相机内参数和畸变参数的初始值。定义优化目标函数为所有特征点实际图像像素坐标与模型解算的图像像素坐标距离的和最小,即:

$$\gamma_{\min} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^d \| \mathbf{m}_{ij} - \hat{\mathbf{m}}_{ij}(\mathbf{A}, \mathbf{R}_i, \mathbf{T}_i, \mathbf{a}_k, \mathbf{b}_k, \bar{\mathbf{M}}_j) \|. \quad (16)$$

选择 LM 算法对上述目标函数进行非线性优化,得到最终的内参数及畸变系数。在实际标定过程中,通过对不同的多项式阶数进行标定实验来选择最合适的阶数 N 。

PSD 传感器的外参数标定是在内参数已知的前提下进行的。采集三组标定板在不同距离上的成像,每组图像有 d 个特征点。借助激光跟踪仪测量出标定板坐标系到世界坐标系之间的旋转平移关系 \mathbf{R}_i 、 \mathbf{T}_i , 就得到空间点在世界坐标系下的坐标 $\bar{\mathbf{M}}_j$ 。

以重投影误差最小构建目标函数,通过 LM 算法进行优化求解:

$$\gamma_{\min} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^d \| \mathbf{m}_{ij} - \hat{\mathbf{m}}_{ij}(\mathbf{A}, \mathbf{R}_i, \mathbf{T}_i, \mathbf{a}_k, \mathbf{b}_k, \bar{\mathbf{M}}_j) \|. \quad (17)$$

3 实验验证

3.1 PSD 相机标定实验

为了验证本课题组提出的标定方法的有效性,将其与传统畸变模型及切比雪夫多项式模型进行对比,使用视觉测量系统和激光跟踪仪进行标定实验。因为 PSD 相机只能对经过调制的红外光源成像,常规的标定板已不再适用。本课题组针对 PSD 的成像特点设计了专用的标定板,整个标定板由 49 个红外 LED 灯组成,相邻两灯的距离为 40 mm,并在红外 LED 灯表面安装了散光片,以保证成像对应于标定板圆孔的中心。同时,为了避免外界光源的干扰,采用 15 kHz 频率正弦波对标定板上的红外 LED 进行调制。在标定时通过上位机软件控制标定板的灯逐个点亮,并记录标定板上红外 LED 灯在 PSD 相机中的成像坐标。部分标定板的成像情况如图 3(c)所示。

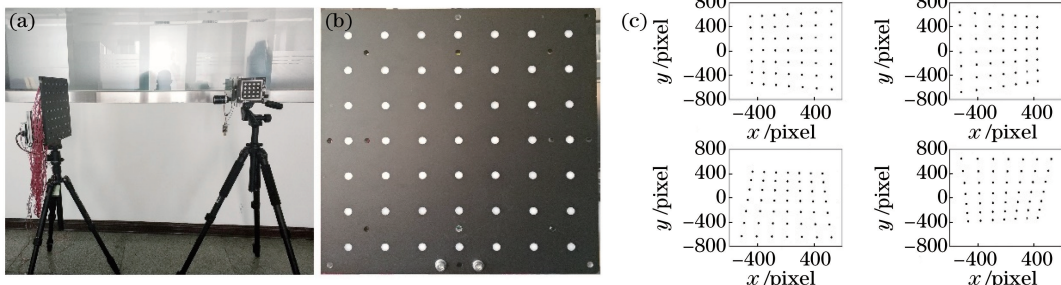


图 3 PSD 相机标定。(a) 标定现场图; (b) 标定板; (c) 标定板成像

Fig. 3 Calibration of PSD camera. (a) Calibration picture; (b) calibration board; (c) calibration board imaging

PSD相机是由本实验室自主研发的,PSD传感器为靶面尺寸为 $9\text{ mm}\times 9\text{ mm}$ 的S5_99101(日本滨松公司),镜头靶面尺寸约为 2.54 m ,焦距为 12 mm ,视场角为 30° 。将PSD图像坐标输出量化为 $(-800,800)$ 范围(即 $1600\text{ pixel}\times 1600\text{ pixel}$),内参数标定在三个距离段采集不同角度的16组数据,外参数标定采集三组不同距离的数据,并借助激光跟踪仪记录标定板坐标系在世界坐标系的位置。将标定结果与传统畸变模型、切比雪夫多项式模型及多项式模型的标定效果进行对比,标定结果采用平均像素误差 $[\sum_{i=1}^h (u_i - \bar{u}_i) / h, \sum_{i=1}^h (v_i - \bar{v}_i) / h]$ 和

最大像素误差 $[\max(u_i - \bar{u}_i), \max(v_i - \bar{v}_i)]$ 来衡量,其中 (u_i, v_i) 为实际成像坐标, (\bar{u}_i, \bar{v}_i) 为标定后的投影坐标。

采用多项式模型和切比雪夫多项式模型对不同多项式阶数的畸变模型进行标定实验,选择标定效果最好的阶数用于精度测试。图4、5为多项式模型与切比雪夫多项式模型的标定结果,横坐标为多项式阶数,图4(a)、图4(b)以及图5(a)、图5(b)的纵坐标均为标定后的 u 、 v 的最大重投影误差,图4(c)、图4(d)以及图5(c)、图5(d)纵坐标为标定后的 u 、 v 平均重投影误差。

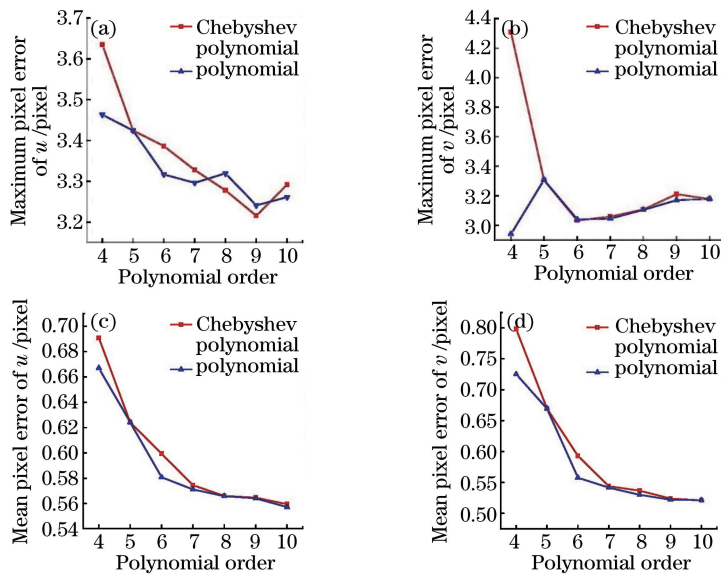


图4 内参数标定结果。(a)(b)最大像素误差;(c)(d)平均像素误差

Fig. 4 Intrinsic parameter calibration results. (a)(b) Maximum pixel errors; (c)(d) mean pixel errors

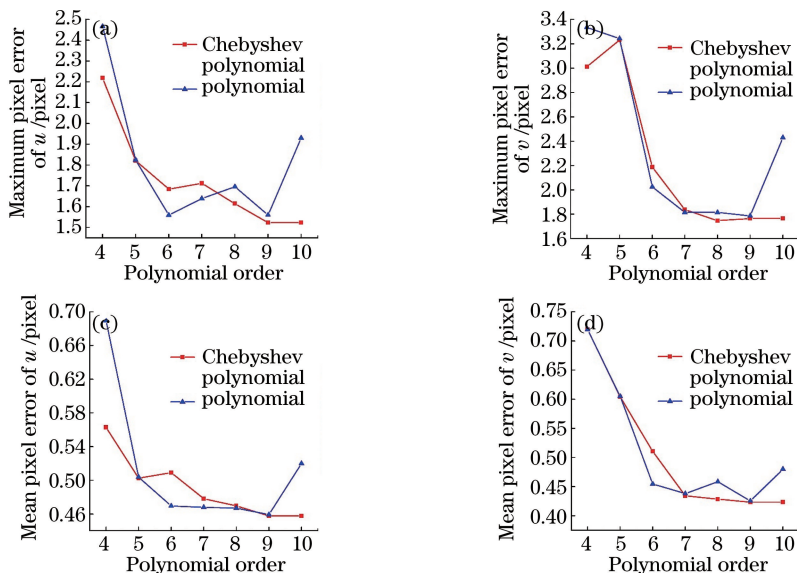


图5 外参数标定结果。(a)(b)最大像素误差;(c)(d)平均像素误差

Fig. 5 Extrinsic parameter calibration results. (a)(b) Maximum pixel errors; (c)(d) mean pixel errors

结合图 4、图 5 可以看到,多项式模型与切比雪夫多项式模型在阶数大于 4 时,重投影误差已经优于传统畸变模型。当多项式阶数增大时,畸变系数增多,标定误差减小;而若阶数过大,当数据点的个数不够充分时就会出现过拟合的情况。因此多项式模型与切比雪夫多项式模型都出现了随着阶数增大,重投影误差先减小后增大的情况。对于多项式

模型来说,多项式阶数为 7 时能获得一个较好的标定结果,而切比雪夫多项式模型在阶数为 8 时能获得较好的结果。7 阶多项式、8 阶切比雪夫多项式及传统畸变模型的标定结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出,传统畸变模型比另两种模型的重投影误差大,而多项式模型能以一个较低的阶数获得与切比雪夫多项式模型相媲美的标定结果。

表 1 7 阶多项式模型、8 阶切比雪夫多项式模型及传统畸变模型的标定结果

Table 1 Calibration results of 7th order polynomial model, 8th order Chebyshev polynomial model and traditional distortion model

Error	Distortion model	Intrinsic parameter		Extrinsic parameter	
		u	v	u	v
Maximum error	Traditional model	5.15	6.09	3.28	4.75
	Chebyshev polynomial model	3.28	3.12	1.61	1.75
	Polynomial model	3.29	3.04	1.64	1.81
Mean error	Traditional model	0.94	1.25	0.88	1.26
	Chebyshev polynomial model	0.57	0.54	0.47	0.43
	Polynomial model	0.57	0.54	0.47	0.44

3.2 位姿测量实验

为验证 PSD 相机的标定效果,进行实际位姿测量的精度测试实验。实验基于 4-LED 灯靶标板(如图 6 所示)进行,靶标板按 160 mm 间距呈正方形分布。测试板坐标系在相机测量坐标系下的位姿以三个位置量和三个旋转量组成的六自由度姿态表示。以激光跟踪仪记录的靶标板坐标系在 PSD 相机测量坐标系下的位姿状态为标准值。为了避免外界环境的干扰以及 4 个灯之间的相互干扰,对 4 个红外 LED 分别采用 9,15,20,25 kHz 的频率进行调制并逐个点亮,由于 PSD 相机对不同调制频率的红外 LED 成像位置不一致,所以采用上述标定方案对 PSD 相机在 4 种调制频率下分别进行标定。根据 4 个 LED 灯之间的位置关系及其在 PSD 相机中的成像坐标求解靶标板的位置姿态,求解方法选择迭代法。将 4 个目标点的重投影误差平方和最小作为优化目标,对六自由度姿态进行优化。

目前,实验室条件下靶标板精度测试距离覆盖范围为 600~1200 mm,在该范围内共采集了 20 组

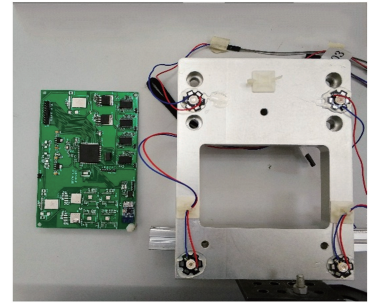


图 6 测试板

Fig. 6 Test board

数据。测试板坐标系相对于世界坐标系的位姿用六自由度姿态来描述。测试精度统计结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出,多项式模型能获得与切比雪夫多项式模型相近的精度,且都优于传统畸变模型。在距离方向上多项式模型的最大误差为 2.01 mm,姿态角最大误差为 2.44°。误差主要来源于相机标定的误差,PSD 相机成像时输出坐标的稳定性误差以及迭代求解过程中的误差。传统畸变模型由于本身对 PSD 的标定效果并不理想,在位姿求解时误差较大。

表 2 精度测试结果

Table 2 Accuracy test results

Distortion Model	Error	Relative position /mm			Relative attitude angle / (°)		
		T_x	T_y	T_z	A_x	B_y	C_z
Traditional distortion Model	Average error	1.03	0.32	2.11	1.59	1.99	0.23
	Maximum error	3.67	1.26	5.52	6.10	6.46	0.56
Chebyshev polynomial model	Average error	0.13	0.28	0.89	0.29	0.19	0.07
	Maximum error	0.29	0.55	1.90	2.26	0.62	0.19
Polynomial model	Average error	0.12	0.27	0.86	0.33	0.18	0.06
	Maximum error	0.28	0.56	2.01	2.44	0.76	0.20

3.3 模型解算时间仿真实验

针对位姿解算对实时性的要求,对上述三组模型进行仿真实验,选取上述标定结果和测试板模型作为已知参数,计算投影图像坐标,并引入 0.5 pixel 误差进行位姿计算仿真实验(所有计算工作在 Intel (R) Core(TM) i7-6700 3.4 GHz 处理器,4 GB 内存,Win 7 系统下完成),选取 600~1600 mm 距离段进行遍历仿真实验,进行 25000 次位姿解算,仿真结果如表 3 所示。

表 3 不同模型的运行时间

Table 3 Running time of different models

Distortion Model	Running time /ms
Chebyshev polynomial model	2.144
Polynomial model	1.440
Traditional distortion model	0.374

由表 3 可见:传统畸变模型的参数最少,计算速度最快,但位姿解算实验中的精度最差(3.2 节);多项式模型相较于切比雪夫多项式模型来说没有三角函数运算,因而多项式模型在获得与切比雪夫多项式模型相近解算精度的情况下,位姿解算速度更快,更能满足实际工程的需要。

4 结 论

针对基于 PSD 传感器的视觉测量系统提出了一种新的标定方法。针对 PSD 相机的镜头畸变和 PSD 自身非线性的影响,使用多项式畸变模型克服了传统畸变模型对 PSD 相机畸变标定不理想以及切比雪夫多项式模型过于复杂、计算量较大的问题。在标定精度、位姿解算精度与切比雪夫多项式模型相媲美的情况下,所提标定方法的计算量更小,计算速度更快,更能满足对实时性要求较高的位姿测量。

参 考 文 献

- [1] Chen D Y, Lin B, Chen Y Q. Development and progressing of position sensitive detector[J]. *Optical Instruments*, 2004, 26(4): 68-71.
陈冬严, 林斌, 陈钰清. 位置敏感探测器(PSD)的研究进展[J]. *光学仪器*, 2004, 26(4): 68-71.
- [2] Zou Y Y, Guo D Z, Zhang X J, *et al.* Research on motion stability measurement of guide rails based on position sensitive detector [C]. 2010 International Conference on Future Industrial Engineering and Application, 2010: 72-75.
- [3] Li T Z, Wang S Y, Shen J, *et al.* Nonlinear error analysis of improved PSD and its applications [J].

Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(2): 123-127.
李田泽, 王淑云, 申晋, 等. 改进型 PSD 非线性误差分析及其应用研究 [J]. *光电工程*, 2008, 35(2): 123-127.

- [4] Yamamoto K, Yamaguchi S, Terada Y. New structure of two-dimensional position sensitive semiconductor detector and application [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1985, 32(1): 438-442.
- [5] Yuan H X, Wang Z X, He A Z. Algorithm study of non-linear correction of PSD [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1999, 20(3): 271-274.
袁红星, 王志兴, 贺安之. PSD 非线性修正的算法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 1999, 20(3): 271-274.
- [6] Liu M. Research on nonlinear compensation of improved neural network PSD [J]. *China Measurement & Test*, 2009, 35(2): 37-39.
刘迈. 改进型的神经网络 PSD 非线性补偿研究 [J]. *中国测试*, 2009, 35(2): 37-39.
- [7] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [8] Tsai R Y. 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.
- [9] Du J Y. Vision based navigation system for autonomous proximity operations: an experimental and analytical study [D]. Texas: Texas A & M University, 2005.
- [10] Chen H, Zhu J G, Xue B. Impact of rough surface scattering characteristics to measurement accuracy of laser displacement sensor based on position sensitive detector [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0808003.
陈浩, 郝继贵, 薛彬. 粗糙表面散射特性对基于 PSD 的激光位移传感器测量精度的影响 [J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0808003.
- [11] Yang D S, Bi S S, Cai Y R, *et al.* Wide-area monocular plane measurement based on calibration on a parallel plane using multiple targets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1015001.
杨东升, 毕树生, 蔡月日, 等. 基于平行面多靶标标定的单目大视场平面测量 [J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1015001.
- [12] Sun J Y, Sun J, Xu C L, *et al.* A calibration method of focused light field cameras based on light field

images [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37 (5): 0515002.

孙俊阳, 孙俊, 许传龙, 等. 一种基于光场图像的聚焦光场相机标定方法[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0515002.

[13] Zou P P, Zhang Z L, Wang P, *et al.* Binocular

camera calibration based on collinear vector and plane homography[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1115006.

邹朋朋, 张滋黎, 王平, 等. 基于共线向量与平面单应性的双目相机标定方法[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1115006.