

doi:10.3788/gzxb20164506.0612003

交汇测量系统线阵相机标定方法

吴培^{1,2}, 王延杰¹, 孙宏海¹, 姚志军¹, 武治国¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 为了提高大靶面交汇测量系统的测量准确度, 分析了交汇测量原理, 推导出脱靶量坐标公式. 根据脱靶量公式分析其各项参量, 利用几何关系建立像元坐标与偏移角度之间的映射模型. 根据映射模型, 利用光栅尺设计了一种针对线阵相机的标定方法, 该方法不考虑相机参量, 将整个光学系统看作一个整体, 基于整体参量直接对像元坐标和它所对应的偏移角进行标定. 实验结果表明, 标定后的交汇测量系统在 1.4 m 处的平均测量误差为 0.4 mm, 最大测量误差优于 0.6 mm. 该方法简单高效, 可提高系统标定的速度, 且标定误差满足系统交汇测量准确度的要求.

关键词: 交汇测量; 线阵相机; 标定; 质心算法; 畸变校正

中图分类号: TP391.4; TP751.1; TP751.2 **文献标识码:** A

文章编号: 1004-4213(2016)06-0612003-7

Calibration Method for Linear Array Camera of Intersection Measurement System

WU Pei^{1,2}, WANG Yan-jie¹, SUN Hong-hai¹, YAO Zhi-jun¹, WU Zhi-guo¹

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to improve the measurement accuracy of the large target intersection measurement system, the miss distance formula of target was derived by analyzing the principle of intersection measurement. According to the parameters of the formula, a mapping model between the pixel coordinate and the offset angle was established by using the geometric relationship. A calibration method for linear camera was designed by using grating scale according to the model. This method takes the whole optical system as a whole and does not need to consider the parameters of the camera, which directly calibrates the mapping relationship between the coordinates and their corresponding offset angles. The experimental results show that the average measurement error of the calibrated intersection measurement system at 1.4 m is 0.4 mm, and the maximum measurement error is better than 0.6 mm. The proposed method is simple but effective, and can improve the speed of the calibration and satisfy the accuracy requirement of the system.

Key words: Intersection measurement; Line array camera; Calibration; Centroid algorithm; Distortion correction

OCIS Codes: 120.012; 100.0100; 150.1488; 040.1490

0 引言

大靶面交汇测量技术是近年来迅速发展起来的一

种非接触式测量技术, 具有结构简单、使用方便、测量准确度高、实时性强和自动化程度高等优点, 已在大型动态目标的轨迹测量上获得了成功的应用^[1-4]. 在线阵

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. 2012AA7031010B)和吉林省科技发展计划(No. 20130102017JC)资助

第一作者: 吴培(1990—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为数字图像处理. Email: wupeiz10@mail.ustc.edu.cn

导师(通讯作者): 王延杰(1963—), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为实时图像处理. Email: wangyj@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2015-12-16; **录用日期:** 2016-03-15

<http://www.photon.ac.cn>

电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)交汇测量系统中,线阵 CCD 相机的标定准确度对整个系统的测量准确度有着直接的影响。

线阵相机由于其成像方式的特殊性,使得其标定方法不同于传统的面阵相机标定.近年来,国内外研究人员针对线阵相机标定做了大量的研究.蔡盛^[5]等采用基于神经网络的方法对线阵相机进行标定;Luna^[6]等根据空间特性提出了一种空间立体交线的标定模型;Hui^[7]等根据主动成像的原理对线阵相机进行标定.但是这些方法都是对相机进行内外参量的标定,标定过程复杂,在后续的使用过程中,需要经常调用内外参量求解目标位置,增大了系统的计算时间和复杂度。

针对这一问题,本文提出了一种基于整体参量的标定方法,直接标定相机采集到的图像像元坐标与目标位置偏移角之间的映射关系.该方法不需要因为系统与目标的相对距离发生变化而进行重新标定,且计算简便,能够快速确定目标的偏移量,系统标定后准确度满足高准确度测量的要求。

1 交汇测量原理

大靶面线阵 CCD 交汇测量系统是根据双目视差的原理,由两台性能基本一致的线阵 CCD 相机构成.在系统中,已知两相机之间的相对位置关系,被测物体所在空间和两相机的像平面之间存在简单的几何关系,通过对几何关系的求解即可获得被测物体的实际位置信息.因此,需要建立模型推导出被测物体的空间坐标与两相机所采集到的像元坐标之间的映射关系。

在大靶面交汇测量系统中两相机成像面中心的连线是系统的基线,两相机光轴与基线的夹角分别为 α 和 β . 交汇测量系统的原理如图 1.

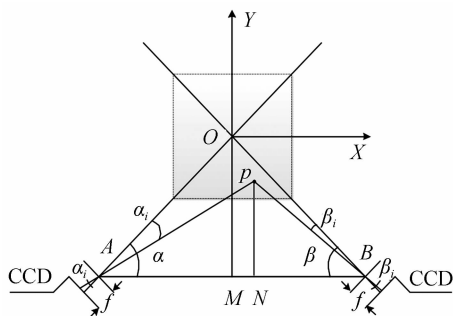


图 1 交汇测量原理

Fig. 1 The schematic diagram of intersection measurement

以两光轴的交点 O 为原点建立靶面直角坐标系 XOY , 设空间中一点 P 为目标经过靶面时所处的位置, 目标被两相机捕获成像到 CCD 面阵上, 像点分别距光心 Q_1, Q_2 个像元单位, 规定像点在光心左侧为正, 右侧为负. 设基线 AB 长度为 d_0 , 延长 Y 轴交基线于 M , 过点 $P(x, y)$ 向 AB 作垂线交于点 N , PA 与 OA 的夹角为 α_i , PB 与 OB 的夹角为 β_i . 以 $\triangle OAB$ 为研究对

象, 由正弦定理得

$$\frac{AB}{\sin(\pi - \alpha - \beta)} = \frac{OA}{\sin \beta} = \frac{OB}{\sin \alpha} \quad (1)$$

$$S_{\triangle OAB} = \frac{1}{2} OA \cdot OB \cdot \sin(\pi - \alpha - \beta) = \frac{1}{2} OM \cdot AB \quad (2)$$

$$\frac{d_0 \sin \beta \cdot d_0 \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta) \cdot \sin(\alpha + \beta)} = OM \cdot d_0 \quad (3)$$

化简式(3)可得

$$OM = \frac{d_0}{\cot \alpha + \cot \beta} \quad (4)$$

同理可得

$$PN = \frac{d_0}{\cot(\alpha - \alpha_i) + \cot(\beta - \beta_i)} \quad (5)$$

则

$$y = OM - PN = \left(\frac{1}{\cot \alpha + \cot \beta} - \frac{1}{\cot(\alpha - \alpha_i) + \cot(\beta - \beta_i)} \right) d_0 \quad (6)$$

根据式(1), 在 $\triangle OAB$ 中, 有

$$AM = OA \cos \alpha = \frac{d_0}{1 + \tan \alpha \cot \beta} \quad (7)$$

同理可得

$$AN = \frac{d_0}{1 + \tan(\alpha - \alpha_i) \cot(\beta - \beta_i)} \quad (8)$$

则

$$x = AN - AM = \left(\frac{1}{1 + \tan(\alpha - \alpha_i) \cot(\beta - \beta_i)} - \frac{1}{1 + \tan \alpha \cot \beta} \right) d_0 \quad (9)$$

设相机的像元间距 (CCD 相机像元间的横向尺寸) 为 Δ_1, Δ_2 , 两相机的焦距分别为 f_1, f_2 根据三角函数关系, 可得

$$\alpha_i = \arctan \left(\frac{Q_1 \Delta_1}{f_1} \right) \quad (10)$$

$$\beta_i = \arctan \left(\frac{Q_2 \Delta_2}{f_2} \right) \quad (11)$$

将式(10)、(11)代入式(6)、(9)即可求得目标的脱靶量信息 (x, y) 。

2 标定方法

在大靶面测量系统中, CCD 相机的镜头畸变对测量结果有不可忽略的影响. 根据式(10)、(11), 镜头畸变使物点投影到相机靶面上成像的投影路径发生改变, 使得实际采集到的像点与其理论位置发生偏差, 即式(10)、(11)中的 Q_1, Q_2 产生了测量误差, 从而对最终的目标位置测量准确度造成影响. 因此需要寻找一种有效的标定方法来校正畸变. 然而传统的相机畸变校正方法, 如张正友方法^[8-9], 根据相机的畸变特性对相

机进行内外参量的标定,标定完成后在后续图像处理中需要经常调用这些参量对图像中点的真实位置进行求解,这一运算会增加系统的计算复杂度,降低运算速度。

根据交汇测量系统的测量原理,只需获得目标在相机中位置所对应的真实偏移角即可完成后续的高准确度测量任务,因此,根据“黑盒子”的思想,将相机所处一侧的成像系统看作一个整体,求解出线阵相机中像素位置与目标偏移角之间的映射关系即可完成系统的标定。

如图 2,单独考虑一侧成像系统,简化系统的成像模型,设相机的焦距为 f ,相机靶面中心为 o ,光栅尺平行相机靶面放置交相机光轴于 o' ,设该点为光栅尺中心,光栅尺与相机距离为 L ,光栅尺上与中心距离为 D 的点 x 经过光学系统最终投影到相机靶面上的 x' 处, x' 与 o 点距离为 Q_1 , xx' 和 oo' 的夹角 α 为目标的偏移角,设相机的像元间距为 Δ ,由几何关系可知

$$\alpha = \arctan\left(\frac{Q_1 \Delta}{f}\right) = \arctan\left(\frac{D}{L}\right) \quad (12)$$

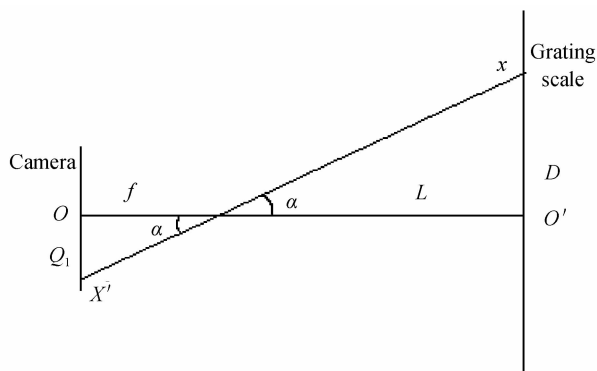


图 2 相机成像示意图

Fig. 2 The schematic diagram of camera imaging

在运算过程中,将反正切函数代入映射关系中会增大运算的复杂度,因此需要对像素位置与目标偏移角之间的映射关系进行分步求解。首先,求解光栅尺上目标的实际位置 D 与目标在相机中成像的像元位置 Q_1 之间的映射关系,然后,根据系统的准确度要求细分像元,结合映射关系求解各像元所对应的实际位置 D 。最后,根据式(12)求解其对应的 α 角,建立像元位置 Q_1 与偏移角 α 之间的查找表。

因此标定方法的关键就是寻找一个合适的数学模型,能够准确反映出像元位置与实际位置之间的关系。该模型实质上是相机畸变模型的变形,传统的畸变模型表述的是实际像元坐标与理想像元之间的关系,而在本方法中,令畸变模型表述实际像元坐标与理想目标位置之间的关系。

研究者针对各种类型的畸变做了大量研究,建立了多种数学模型^[10-12],使畸变可以通过多项表达式表

示出来,主要有径向畸变 δ_r 、偏心畸变 δ_d 、薄棱镜畸变 δ_p 以及倾斜畸变 δ_t ,忽略高阶项可以分别表示为

$$\delta_r = k_1 x(x^2 + y^2) \quad (13)$$

$$\delta_d = p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2 xy \quad (14)$$

$$\delta_p = s_1(x^2 + y^2) \quad (15)$$

$$\delta_t = a_0 x + a_1 y + a_2 xy + a_3 \quad (16)$$

假设系统的相机装配没有问题,则可以忽略薄棱镜畸变对系统的影响。就线阵 CCD 相机而言,仅需要考虑 X 轴方向上的分量,因此忽略高阶项,相机的畸变模型可以表示为

$$X = k_1 x^3 + k_2 x^2 + k_3 x + k_4 \quad (17)$$

综上,交汇测量系统中线阵相机的标定方法可以简单的描述为:

- 1) 根据式(17)建立相机像素位置与目标实际位置之间的畸变模型,求解畸变参量;
- 2) 通过畸变模型求解各像素位置所对应的实际目标位置,代入式(12),求解出对应的偏移角,并建立查找表。

用线阵 CCD 进行交汇测量时,理论上最好的成像面应是在两 CCD 像元排列方向构成的平面内,然而在实际标定的过程中,相机靶面与光栅尺不可能严格平行,设二者夹角为 γ ,则式(12)变为

$$\alpha = \arctan\left(\frac{D \cos \gamma}{L}\right) \quad (18)$$

式(18)对 γ 求导可得

$$\alpha' = -\frac{L^2 \sin \gamma}{L^2 + D^2 \cos^2 \gamma} \quad (19)$$

在实际标定过程中相机已经固定在转台上并且进行了准确度上的校正,光栅尺以铅垂线为基准进行放置,光栅尺与相机靶面之间虽然不一定严格平行但是其偏差在一定的可控范围内,通过实验发现光栅尺上的目标在相机中成像的纵坐标偏差最大为 5 个像元,即 γ 很小,此时, α' 很小,即式(18)的变化率很小,相机靶面与光栅尺的平行误差对系统测量准确度的影响很小,在进行标定的过程中不需要考虑。

该标定方法反映的是像元坐标与偏移角之间的映射关系,不受目标与相机距离变化的影响,不需要重复标定,而且对标定环境没有过多苛刻的要求。标定完成后,系统只需要查表找出像元坐标所对应的偏移角代入式(6)、(9)即可。该过程不需要重复进行大量的数学运算,从而可以提高系统的计算速度。

3 实验

3.1 相机标定

如图 3,相机已经固定在转台上并且与转台自身调校完成,将光栅尺竖立于转台前方,光栅尺上安装两可移动的 LED 标志灯,调整转台使标志灯出现在相

机视场的竖直中心,本次实验中光栅尺距离相机 1.28 m.以相机中心为靶面原点,偏离原点的像元数为该点的坐标值,规定左为负右为正,假设相机采集到的像素点为 $(x,0)$,光栅尺上与相机中心相对应的点规定为光栅尺原点,标志灯偏离光栅尺原点的距离为光栅尺偏移量 $(D,0)$,规定上正下负.

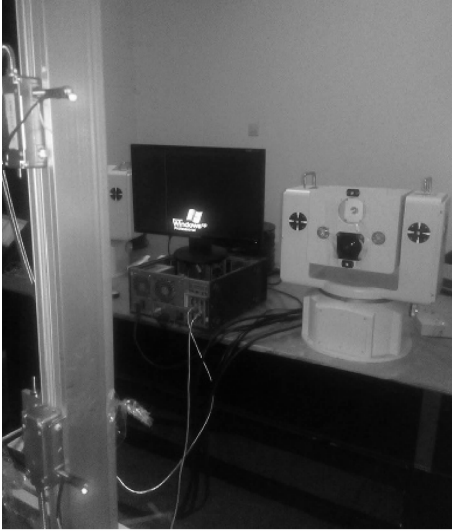


图3 标定实验环境

Fig. 3 Calibration experiment environment

在式(12)中 f 值不变,因此求解的过程可以表示成根据 x 求解对应的 $\frac{D}{L}$ 后做反切变换,设二者之间的关系为

$$\tan \alpha_i = \frac{D}{L} = g(x) \quad (20)$$

相机的畸变参量标定方法为:

- 1) 调整转台角度使标志灯出现在相机视场中央;
- 2) 测量相机镜头与光栅尺的距离 L ;
- 3) 记录标志灯在光栅尺上的位置读数 D 并采集相应的图像;
- 4) 求解图像中的坐标 x ;
- 5) 移动标志灯,重复步骤3)、4)进行多组采样;
- 6) 根据式(17)中的畸变模型求解 x 与 D 的映射参量;
- 7) 根据系统准确度要求细分图像像元位置,代入映射函数求出对应的位置信息 D ,结合距离 L 求解偏移角 α ,建立像元位置 x 与偏移角 α 之间的查找表.

步骤4)中,线阵 CCD 相机采集到的图像如图4,图像中白色竖线为标志灯所在的位置,可以看出该竖线并不是单像素宽度,这是因为实验中的 LED 标志灯并非严格的点光源.通过局部放大图可以看出,标志灯所占的像元数为5个左右,可以近似看作点光源进行后续处理.但是为了精确求得标志灯所处的位置,需要对采集到的图像进行处理以求解竖线的质心.

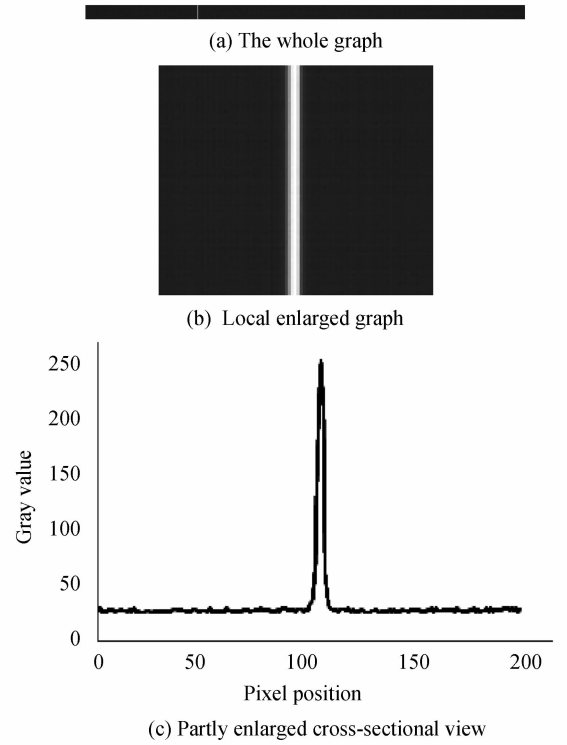


图4 线阵相机采集到的标志灯图像

Fig. 4 The image of the marker light captured by the linear camera

在该系统中仅需要确定质心的 x 坐标.目前对图像质心的求解方法已经比较成熟,常用的质心求解算法有普通质心算法、加强权重质心算法、阈值质心算法、距离质心算法等^[13-15].本文中采用阈值质心算法,首先对图像进行阈值分割,然后根据式(21)所示的质心公式求解质心.通过质心算法求解标志灯坐标可以对相机像元进行细分,更加精确地反映出目标在相机中成像的准确位置,提高后续畸变参量求解的准确度.

$$x = \frac{\sum_{ij} x_{ij} I_{ij}}{\sum_{ij} I_{ij}} \quad (21)$$

在得到畸变参量后,遍历各像素坐标值求得对应的偏移角,建立一个明确反映像元坐标与偏移角之间一一映射关系的查找表.该查找表直接表示的是像元位置 x 与角度 α_i 之间的关系,不随转台与目标之间距离 F 的改变而改变,因此只需一次标定即可,具有普适性.

3.2 准确度分析

为了验证本文标定方法的标定准确度,设计了三组实验,分别验证畸变模型的可靠性、单个相机的校正准确度,以及校正后双相机交汇测量准确度.

3.3.1 畸变模型验证

根据式(17)提出的畸变模型,随机采样70个点,分别对4台相机进行标定.标定完成后,根据得到的畸变参量求解采样点在畸变模型中的位置,并与实际位置进行误差分析.采样点位置偏差分析如图5,图中横

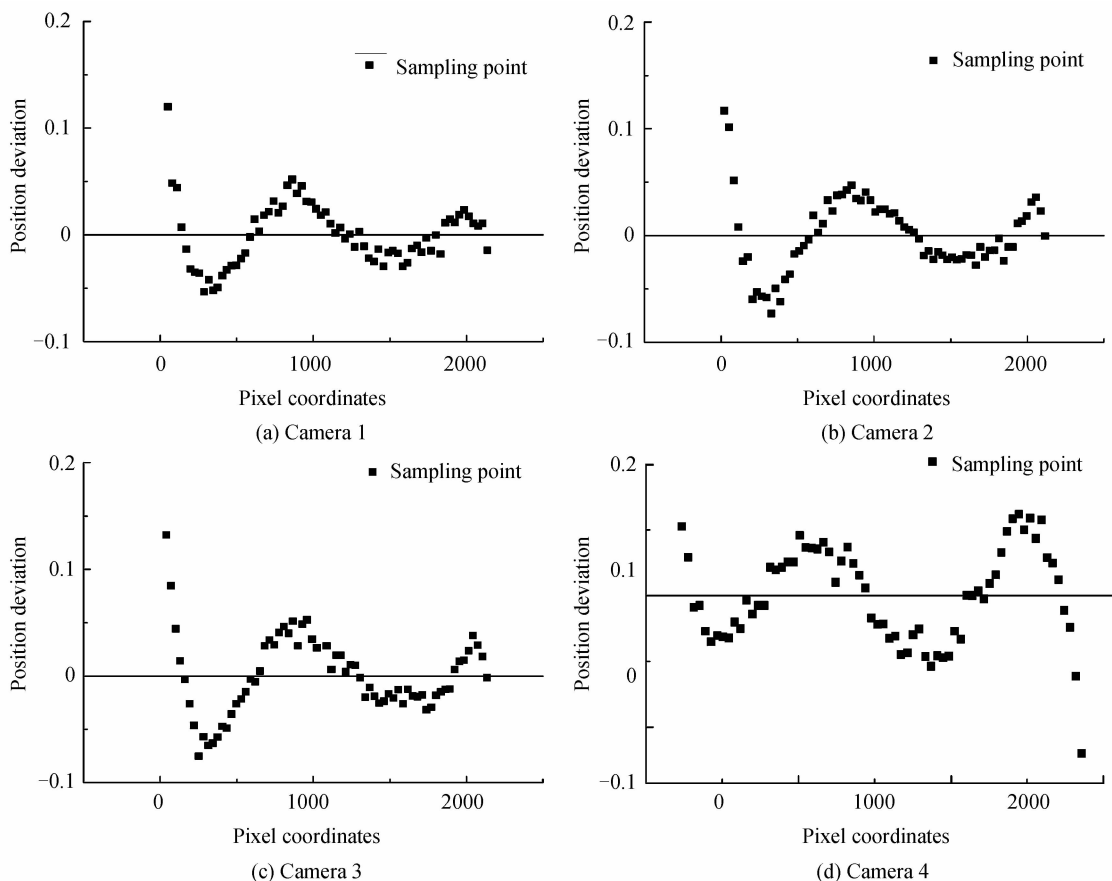


图5 采样点位置误差分析图

Fig. 5 The position error analysis chart of the sampling points

坐标为像元位置坐标,纵坐标为计算位置与实际光栅尺读数的偏差,单位为 0.02 cm/刻度。

计算 4 台相机采样点偏差的标准差的平均值,结果见表 1,其中,标准差单位为光栅尺刻度,一光栅尺刻度等于 0.2 mm.

表 1 标准差分析表

Table 1 The standard deviation analysis table

No.	1	2	3	4
Standard deviation	0.0305	0.0358	0.0373	0.0260

结合图 5 和表 1 可以看出,畸变模型能够很好地反映出像元位置与实际目标位置之间的映射关系,计算结果与实际位置的偏差很小,能够满足系统测量准确度的要求。

3.3.2 单相机校正准确度验证

系统中四台相机的视场角大约为 63° ,像元个数为 2336 个,则分辨率约为 $97.089''$ 。四台相机完成标定后,根据查找表计算相邻像元之间的角度偏差,验证相机的角分辨率,结果见表 2。

由几何关系可知,处于相机中心位置处的像元,彼此之间的偏差角较大,处于相机边缘位置处的像元,彼此之间的偏差角较小。四个相机的平均分辨率均优于 $97''$,符合相机标定的要求。

表 2 相机视场角偏差分析

Table 2 The analysis of camera angle deviation

No.	Minimum error/($''$)	Maximum error	Average error
1	81.159	105.676	96.954
2	80.629	105.209	96.406
3	81.275	105.056	96.361
4	80.578	104.418	95.881

完成相机标定后,改变光栅尺与相机的距离,移动光栅尺上的目标,记下实际移动的距离并与相机测得的距离进行比较,实验环境如图 6。



图 6 相机测量准确度分析实验环境

Fig. 6 The experimental environment of camera measurement accuracy analysis

为了验证标定后的相机对远距离目标的测量准确度,光栅尺在位置 1 处完成对相机的标定后,分别移到位置 2 和 3 进行数据采样分析,其中位置 2 距相机 3.29 m,位置 3 距相机 5.27m. 在每个位置处随机采样 13 个点,计算出这些采样点的位置,并与实际的光栅尺读数进行比较,结果见表 3、4.

表 3 位置 2 处测量误差分析

Table 3 The measurement error analysis at position 2

Actual position/cm	Calculated position	Error
0	0	0
10.047	10.0656	0.0186
20.102	20.157	0.055
30.0039	30.0757	0.0718
40.0001	40.1578	0.1577
50.0287	50.1676	0.1389
60.1223	60.2906	0.1683
70.0385	70.2452	0.2067
80.0235	80.2632	0.2397
90.07046	90.3103	0.23984
100.0054	100.2648	0.2594
110.1761	110.3762	0.2001
120.026	120.246	0.22
130	130.2086	0.2086
Cumulative error		0.2086

表 4 位置 3 处测量误差分析

Table 4 The measurement error analysis at position 3

Actual position/cm	Calculated position	Error
0	0.0000	0.0000
10.1847	10.2023	0.0176
20.0171	20.0724	0.0553
30.0877	30.1614	0.0737
40.1405	40.2699	0.1294
50.1585	50.3451	0.1866
60.0067	60.3164	0.3097
70.1232	70.3990	0.2758
80.0313	80.3443	0.3130
90.0092	90.3712	0.3620
100.1118	100.4916	0.3798
110.1207	110.5254	0.4047
120.1053	120.5190	0.4137
130.009	130.4385	0.4295
Cumulative error		0.4295

通过表中数据可知相机在 3.26 m 处的最大累计误差为 0.2086 cm, 每米测量误差为 $(0.2086/130) \times 100 = 0.1605$ cm, 在 5.27 m 处的最大累计误差为 1.16 cm, 每米测量误差为 $(0.4295/130.009) \times 100 = 0.3303$ cm. 该误差能够满足远距离测量准确度的要求.

3.3.3 交汇测量系统准确度验证

对交汇测量系统进行准确度分析的实验环境如图

7(a), 主要由两台标定好的相机和一个靶板构成. 靶板的结构如图 7(b), 靶板由一个中心和 8 个距中心半径为 100 mm 的点构成, 测量目标为一个圆柱体, 该目标可以固定在这 9 个点上. 交汇测量系统首先测量中心点, 确定其空间位置坐标作为靶板坐标系的中心, 之后在周围 8 个点上依次移动目标, 测量其空间位置, 并转换成靶板坐标系下的坐标.



(a) Integral structure diagram



(b) Target plate

图 7 交汇测量系统准确度分析实验环境

Fig. 7 The environment of intersection measuring system accuracy analysis

交汇测量系统对靶目标进行多次测量取其均值, 计算目标在 x 轴、 y 轴以及相对中心距离的偏差, 结果见表 5.

表 5 系统测量误差分析表

Table 5 The measurement error analysis table of the system

No.	Deviation in x -axis/mm	Deviation in y -axis/mm	Distance deviation
1	0.33	0.14	0.13
2	0.37	0.46	0.46
3	0.49	0.08	0.49
4	0.21	0.04	0.21
5	0.06	0.57	0.45
6	0.12	0.03	0.11
7	0.48	0.32	0.56
8	0.57	0.31	0.62
Average value	0.33	0.24	0.38

从表中可以看出, 交汇测量系统在 x 轴、 y 轴以及相对中心距离上的平均测量误差优于 0.4 mm, 且最大误差不超过 0.6 mm. 实验中目标与系统的距离约为

1.4 m,此时的测量误差能够满足系统的准确度要求。

4 结论

大靶面交汇测量系统中,线阵 CCD 相机的标定准确度直接影响了整个系统的标定准确度。本文通过分析交汇测量的原理,设计了一种基于整体的标定方法,直接将像元位置与偏移角度相映射,省去了中间复杂的数学运算,提高了系统的运行速度。该方法不受相机与目标的距离变化的影响,不受镜头焦距的限制,相机靶面与光栅尺的平行度对标定准确度影响较小。系统完成标定后即可获得像元坐标与偏移角的映射关系。实验证明,通过该标定方法标定的交汇测量系统,在测量距离为 1.4 m 左右时,测量平均误差优于 0.4 mm 且最大误差不超过 0.6 mm,能够很好地满足系统高精度测量的要求。

参考文献

- [1] WANG Ying, ZENG Guang-yu. Intersection measuring system of erecting target with dual liner CCD [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(10): 33-38.
王英,曾光宇. 双线阵 CCD 交汇测量立靶准确度系统研究[J]. 光电工程, 2011, **38**(10): 33-38.
- [2] LI Xia, ZHAO Jian-ke. Pose simulation and calibration of objects in door for high-speed TV measurement system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1360-1363.
李霞,赵建科. 高速电视姿态测量系统室内目标姿态模拟与标定测量[J]. 光子学报, 2007, **36**(7): 1360-1363
- [3] WANG Min, SONG Li-wei, QIAO Yan-feng, et al. Convergence algorithm of field stitching and intersection measurement for external field stitching measuring system and its implementation [J]. *Chinese Optics*, 2010, **15**(3): 229-238.
王旻,宋立维,乔彦峰,等. 外视场拼接测量系统的视场拼接和交汇测量算法及其实现[J]. 中国光学, 2010, **15**(3): 229-238.
- [4] HOU Hong-lu, ZHOU De-yun. Measurement method and location optimization of multi-photoelectric theodolite for positioning of aviation weapons [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 1023-1028.
侯宏录,周德云. 光电经纬仪异面交会测量及组网布站优化设计[J]. 光子学报, 2008, **37**(5): 1023-1028.
- [5] CAI Sheng, LI Qiao-an, QIAO Yan-feng. Camera calibration of attitude measurement system based on BP neural network [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(7): 832-834.
蔡盛,李清安,乔彦峰. 基于 BP 神经网络的姿态测量系统摄像机标定[J]. 光子学报, 2007, **18**(7): 832-834.
- [6] LUNA C A, MANUEL M, LAZARO J L, et al. Calibration of line scan camera [J]. *IEEE Transaction on Instrument and Measurement*, 2010, **59**(8): 2185-2190.
- [7] HUI B W, WEN G J, ZHAO Z X. Line scan camera calibration in close range photogrammetry [J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(5): 053602.
- [8] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330-1334.
- [9] XU Chao, GAO Min, CAO Huan. The attitude angle estimation-based distance measurement of tank target in monocular image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(5): 0512002.
徐超,高敏,曹欢. 单目图像中姿态角估计的坦克目标测距方法[J]. 光子学报, 2015, **44**(5): 0512002.
- [10] HUANG Jun-hui, WANG Zhao, XUE Qi, et al. Calibration of camera with rational function lens distortion model [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **05**: 170-176.
黄军辉,王昭,薛琦,等. 基于有理函数式镜头畸变模型的摄像机标定[J]. 中国激光, 2014, **05**: 170-176.
- [11] YAO Na, LIN Zhao-rong, REN Chao-feng, et al. A Distortion model suitable for nonlinear distortion correction of digital video camera [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, **02**: 171-178.
姚娜,林招荣,任超锋,等. 一种适合摄像机非线性畸变校正的畸变模型[J]. 激光与光电子学进展, 2014, **02**: 171-178.
- [12] CHEN Wei-bing. Distortion model analysis and establishment for real-time image simulation [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, **47**(6): 168-171.
陈卫兵. 实时图仿真中畸变模型的分析与建立[J]. 计算机工程与应用, 2011, **47**(6): 168-171.
- [13] GAO X, DING D, BAI T, et al. Weld-pool image centroid algorithm for seam-tracking vision model in arc-welding process [J]. *Image Processing, IET*, 2011, **5**(5): 410-419.
- [14] YANG Xin-yu, KONG Qing-ru, DAI Xiang-jun. An improved weighted centroid location algorithm [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, **44**(08): 1-4.
杨新宇,孔庆茹,戴湘军. 一种改进的加权质心定位算法[J]. 西安交通大学学报, 2010, **44**(08): 1-4.
- [15] ANG Peng, XIE Li, LIU Ji. Zernike moment based high-accuracy sun image centroid algorithm [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, **32**(9): 1963-1970.
杨鹏,谢立,刘济林. 基于 Zernike 矩的高准确度太阳图像质心提取算法[J]. 宇航学报, 2011, **32**(9): 1963-1970.

Foundation item: The National High Technology Research and Development Program of China (No. 2012AA7031010B), the Science and Technology Developing Plan of JiLin Province (No. 20130102017JC)