

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.06.019

# 一种联合 FAST 算法和 双像光束法平差的相机标定方法

宋胜嘉<sup>1</sup>, 朱勇超<sup>1</sup>, 苏杰<sup>2</sup>, 陆秋伶<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 兰州天润四方工程技术有限公司, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**非量测相机以价格低、体积小、使用灵活等优势被广泛应用于高精度测量工作中,但相机标定结果对测量精度影响较大,针对现有相机标定方法存在着精度不够或标定效率不高等问题,文章提出一种联合加速分割检测特征(features from accelerated segment test, FAST)算法和双像光束法平差的相机标定方法。首先利用 FAST 算法对像片标志点自动提取,利用直接线性变换方法解得相机内、外参数初值;然后基于固定基线长度约束的双像光束法平差模型解算相机相关参数,并通过分类阈值方法提高模型收敛效率。结果表明:该方法相较于普通双像光束法平差的精度有所提升,其标定后的中误差达到 0.006 4 mm,且实现了相机标定流程的半自动化,提高了作业效率,有望应用于实际场景的相机标定作业。

**关键词:**相机标定;双像光束法;平差模型;FAST 算法

**中图分类号:**P232

**文献标志码:**A

**文章编号:**1003-5060(2025)06-0833-06

## A camera calibration method combining FAST algorithm and double image beam adjustment

SONG Shengjia<sup>1</sup>, ZHU Yongchao<sup>1</sup>, SU Jie<sup>2</sup>, LU Qiuling<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Lanzhou Tianrun Sifang Engineering Technology Co., Ltd., Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Non-measuring cameras are widely used in high-precision measurement because of their low price, small size and flexible use. However, camera calibration results have a great influence on the measurement accuracy, and the existing camera calibration methods have some problems such as insufficient accuracy or low efficiency. In this paper, a camera calibration method combining features from accelerated segment test (FAST) and double image beam adjustment is proposed. Firstly, the FAST algorithm was used to extract the marks automatically, and the initial values of the internal and external parameters of the camera were obtained by direct linear transformation method. Then, the relative parameters of the camera were calculated by the double image beam adjustment model based on the fixed baseline length constraint, and the convergence efficiency of the model was improved by the classification threshold method. The experimental results show that the proposed method has improved the accuracy of adjustment compared with the ordinary double image beam method, and the calibration error reaches 0.006 4 mm. Moreover, the semi-automatic camera calibration process is realized, and the operation efficiency is improved. It is expected to be applied to the actual camera calibration operation.

**收稿日期:**2023-04-18; **修回日期:**2023-05-05

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(42104019; 42171141); 中国科学院精密测量与技术创新研究大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金资助项目(SKLGED2022-3-7)

**作者简介:**宋胜嘉(2000—),女,安徽和县人,合肥工业大学硕士生;

朱勇超(1990—),男,湖北天门人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: yczhu@hfut.edu.cn.

**Key words:** camera calibration; double image beam method; adjustment model; features from accelerated segment test (FAST) algorithm

数码相机作为拍摄的主要设备被人们所熟知,随着摄影测量数字化的发展,数码相机作为主要设备承担了大部分数据采集工作,与各个学科的交叉更为广泛,在不同的领域均有涉及。摄影测量学和计算机视觉的交叉也应运而生,虽然在研究内容上存在较大区别,但都需要建立相机描述影像与真实场景的联系,这就需用到相机标定。后续数据处理工作的成果质量在很大程度上也会受到相机标定结果的影响。

基于相机标定的效果好坏对于后续数据处理工作结果精度的重要性,学者们对提高相机标定精度开展研究,通过长时间的积累和对算法不断改善,形成几种较为优秀的算法。文献[1]提出直接线性变换(direct linear transformation, DLT)方法,通过建立控制点的像点坐标和物方空间坐标的线性方程组解出相机成像几何模型的参数估计值;文献[2]通过拍摄不同旋转角的影像消除旋转矩阵的相关性并选取不同斜率的主纵线,解决二维 DLT 无法算出唯一参数的问题;文献[3]对检校参数的耦合误差进行研究,提出对直接线性变换解法进行改进的方案;文献[4]为了提高直接线性变化的相机检校精度,在计算中采用加权的方法。

光束法平差对比直接线性变换算法有较强的拓展性,在实际应用中可以根据不同的条件调整相对应的平差模型,通过最小二乘法进行整体平差,得到精度较高的检校结果<sup>[5]</sup>。文献[6]使用标靶来获得精度更高的初值,优化过程中的问题收敛,但在提高初值精度时,往往需要更多的人工预处理。光束法本质上利用最小二乘原理进行平差运算,理论较为严密,但也存在着过于依赖初始值精度,迭代速度较慢等问题。有学者通过将更多约束条件纳入平差模型的方式获得更精确的解算结果,文献[7]在光束法平差模型中融合路标点特征和车道线特征来优化自动驾驶车辆的姿态信息;文献[8]为解决纹理缺乏场景中机器人的状态优化问题提出点面光束法平差模型;文献[9]提出 BFGS-GN 法,提升光束法平差对不同类型初值的鲁棒性。

本文基于光束法平差的相机标定方法,结合相机标定实际应用的特点,提出一种联合加速分割检测特征(features from accelerated segment

test, FAST)算法和双像光束法平差的相机标定方法。结果表明该方法相较于普通的光束法平差精度有所提升,且提高相机标定的作业效率。

## 1 相机标定的理论基础

在摄影测量过程中,为描述现实环境中物点的空间位置与其在相片中对应点的关系,必须建立相机成像的几何模型,其中几何模型的参数即为相机参数,求解参数的过程称为相机标定。

相机标定是近景摄影测量一个关键的环节,其标定好坏会直接影响后续数据处理成果。

### 1.1 相机标定原理

在进行相机标定时,要将世界坐标系转换为相机坐标系再向图像坐标系转换。首先是空间坐标到平面坐标的转换,这一过程包括旋转矩阵  $\mathbf{R}$ 、相机外参等参数;然后是从三维坐标到平面坐标的转换,包括相机内参等参数。

相机的内参除焦距  $f$ 、像主点坐标  $(x_0, y_0)$  这些均只受相机本身装配等影响外,还包含畸变系数  $(\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, p_1, p_2)$ ,理想的镜头不会产生畸变的,加入透镜会对成像效果产生一些影响。其中  $(\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3)$  为径向畸变,  $(p_1, p_2)$  为切向畸变,畸变也是相机固有的特性,同款相机的即便有不同,但是和相机内参标定一致即可。

结合径向畸变和切向畸变纠正的模型,得到畸变校正后的实际点坐标  $(x_{\text{cor}}, y_{\text{cor}})$ ,即

$$\begin{cases} x_{\text{cor}} = x(1 + \kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6) + \\ \quad 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2), \\ y_{\text{cor}} = y(1 + \kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6) + \\ \quad 2p_2 xy + p_1(r^2 + 2y^2) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$ 。通过式(1)所述模型可以得到没有畸变的标定结果。

### 1.2 FAST 算法

FAST 算法是一种特征点检测方法,能用于图像角点的自动识别与标记。在双像和单像的标志点读取时,为确保更好的结果精度,需提供多数标志点,快捷提取到这些标志点的像素坐标是需要解决的问题。本文中采取 FAST 算法提高标志点的检测速度和自动化程度。

使用 FAST 算法时,首先对图像预处理获得灰度差异更明显的预处理图像,然后将图像中的

像素点定义为角点,在该像素点周围领域内有足够多的像素点且与该点处于不同的灰度区域内<sup>[10-12]</sup>,也可理解为灰度值大于或小于该点灰度值加上阈值的像素点达到了设定好的数量。取图像中像素点  $P$ ,以其为中心形成一个半径为 3 的离散化的 Bresenham 圆,如图 1 所示<sup>[13]</sup>,中心像素  $P$  周围会有 16 个像素点,按照顺时针依次标序,在这个半径为 3 的圆上有 16 个像素点,设  $P$  点的图像灰度值为  $I_P$ ,给定一个阈值为  $t$ ,如果其中有  $n$  个互相邻近像素点图像灰度值都大于  $I_P + t$  又或者小于  $I_P - t$ ,那么就认定这个圆的中心像素点  $P$  为候选特征点。

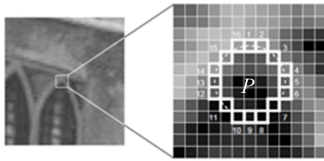


图 1 Bresenham 圆示意图

### 1.3 光束法平差相机标定原理

光束法平差将各张像片中包含的标志点的像点坐标以及一些相对约束等数据都视为观测值,再依据最小二乘原理,整体解算拍摄像片的参数。光束法平差是基于共线方程以相机参数和光学畸变系数作为待求值建立非线性函数,经过线性化后按照最小二乘原理进行计算。为获得解算结果,需要为所求的参数提供一个初始值。在求得改正数后,判断改正数是否小于限差。若大于限差则将当前待求值加改正数作为下一次循环的初始值;若小于限差,则迭代结束得到解算结果。双像光束法平差结果精度较高,可以校正像点坐标系统误差并对整体进行平差。

双像光束法是将左右像片的像点坐标视为观测值,统一解算相机的内、外方位元素和各项畸变参数。立体像对的光束法平差(带有畸变参数)的共线方程为:

$$\begin{cases} x - x_0 - \Delta x = \\ \quad -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}, \\ y - y_0 - \Delta y = \\ \quad -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $(x, y)$  为像点的像素坐标;  $(X, Y, Z)$  为相对对应物点的物方空间坐标;  $(X_s, Y_s, Z_s)$  为摄影中心

的物方空间坐标;  $\Delta x, \Delta y$  分别为影像的径向畸变和切向畸变;  $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$  均为旋转矩阵  $\mathbf{R}$  的元素。光束法的误差方程为:

$$\mathbf{V} = [\mathbf{A} \quad \mathbf{B}] \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \end{bmatrix} - \mathbf{L} \quad (3)$$

其中:  $\mathbf{A}$  为误差方程中内方位元素和畸变参数构成的系数矩阵;  $\mathbf{B}$  为误差方程的外方位元素构成的系数矩阵;  $\mathbf{X}_1$  为影像对应的内方位元素及畸变参数的改正数向量;  $\mathbf{X}_2$  为影像外方位元素的改正数向量;  $\mathbf{L}$  为误差方程的常数向量。

基于最小二乘原理法整理式(3),得到相对应的法方程,即

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{A} & \mathbf{A}^T \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^T \mathbf{A} & \mathbf{B}^T \mathbf{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{L} \\ \mathbf{B}^T \mathbf{L} \end{bmatrix} \quad (4)$$

为简化表达,可以将式(4)表述为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N}_{11} & \mathbf{N}_{12} \\ \mathbf{N}_{21} & \mathbf{N}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_1 \\ \mathbf{L}_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

对于双像法平差来说,因为使用相同的相机来拍摄不同位置的 1 组像片,所以 2 张像片的内方位元素及畸变系数应该是相同的,其次对于 1 组像片来说外方位元素肯定有所不同,此处选择将第 2 张像片包含外方位元素求得的  $\mathbf{A}^T \mathbf{B}$ 、 $\mathbf{B}^T \mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}^T \mathbf{B}$  与第 1 张像片的  $\mathbf{A}^T \mathbf{B}$ 、 $\mathbf{B}^T \mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}^T \mathbf{B}$  组合成 1 个大的矩阵,整体对其进行求解,组合后的法方程如下:

$$\begin{bmatrix} 2\mathbf{N}_{11} & \mathbf{N}_{12} & \mathbf{N}_{12}' \\ \mathbf{N}_{21} & \mathbf{N}_{22} & \mathbf{0} \\ \mathbf{N}_{21}' & \mathbf{0} & \mathbf{N}_{22}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \mathbf{X}_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\mathbf{L}_1 \\ \mathbf{L}_2 \\ \mathbf{L}_2' \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中:  $\mathbf{N}_{12}'$ 、 $\mathbf{N}_{21}'$ 、 $\mathbf{N}_{22}'$  分别为第 2 张像片的  $\mathbf{A}^T \mathbf{B}$ 、 $\mathbf{B}^T \mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}^T \mathbf{B}$ ;  $\mathbf{X}_2'$  为第 2 张像片的外方位元素的改正数向量。

在解算获得像片的内方位元素、畸变系数、外方位元素的改正数向量后,对其初始值加上改正值再代入迭代计算,直到改正值达到提前设定好的限差,迭代运算结束,得到严密的相机标定参数。

## 2 相机标定方法

由于室内的三维模型场布设的标志点数量较多,手动选取像点不仅耗时而且容易出现误差,为快捷获取标志点的像点坐标,首先采用 FAST 算法对特征点进行自动提取,然后人工辅助处理个别提取错误的点,实现标志点像点坐标的半自动化提取,提高了实验的效率。

光束法平差过程理论严密,整体精度较高,但是其需要提供一个精度较高的初始值,该研究采

用直接线性变换法初步求解的相机相关参数作为初始值,然后将该初始值代入特定的双像光束法

平差模型解算得到精确的相机参数。本文提出的相机标定方法的流程如图 2 所示。

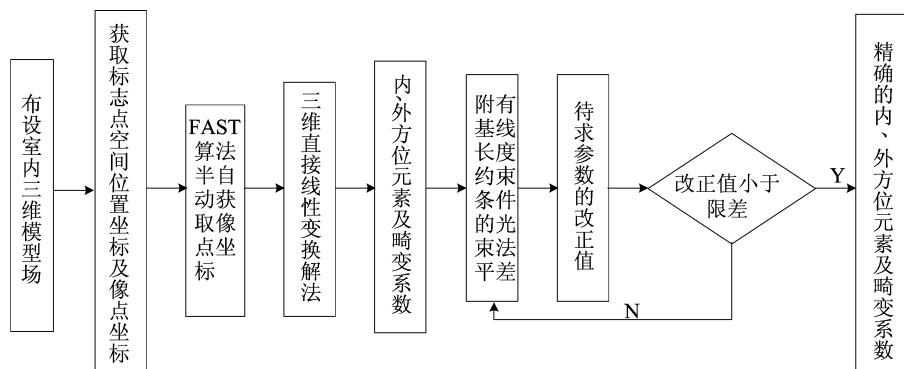


图 2 相机标定方法流程

## 2.1 附有基线长度约束条件的双像光束法平差

为了得到精度更高的相机参数,本文提出在使用固定基线长度的像对进行光束法平差求解相机参数时,考虑将其左、右像片摄影中心的空间距离为固定常数  $k$  的这一约束条件代入平差模型计算求解相机的参数。由基线长度约束条件可得限制条件方程为:

$$\sqrt{(X_{s2} - X_{s1})^2 + (Y_{s2} - Y_{s1})^2 + (Z_{s2} - Z_{s1})^2} - k = 0 \quad (7)$$

附有基线长度约束条件的双像光束法平差方程为:

$$\begin{bmatrix} 2N_{11} & N_{12} & N_{12}' & \mathbf{0} \\ N_{21} & N_{22} & \mathbf{0} & C_1 \\ N_{21}' & \mathbf{0} & N_{22}' & C_2 \\ \mathbf{0} & C_1 & C_2 & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_2' \\ k_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2L_1 \\ L_2 \\ L_2' \\ L_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中,  $C_1$  为限制条件方程对左像片的外方位元素求偏导所得的矩阵,即

$$C_1 = \begin{bmatrix} -2(X_{s2} - X_{s1}) \\ -2(Y_{s2} - Y_{s1}) \\ -2(Z_{s2} - Z_{s1}) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$C_2$  为限制条件方程对右像片的外方位元素求偏导所得的矩阵,即

$$C_2 = \begin{bmatrix} 2(X_{s2} - X_{s1}) \\ 2(Y_{s2} - Y_{s1}) \\ 2(Z_{s2} - Z_{s1}) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

常数项  $L_3$  为:

$$L_3 = k^2 - (X_{s2} - X_{s1})^2 - (Y_{s2} - Y_{s1})^2 - (Z_{s2} - Z_{s1})^2 \quad (11)$$

进一步可以解得待求值的改正数,进行迭代运算后即可得到待求参数的平差值。

## 2.2 分类阈值的迭代运算优化

光束法平差模型的待求值包含了相机的内方位元素、左右像片的外方位元素和光学畸变系数共 20 个待求值。其中:内方位元素的单位是 mm;光学畸变系数为无量纲单位;外方位元素中的直线元素的单位和角元素的单位分别是 m 和 rad。若统一设置待求值的改正数限差,则会出现迭代效率低且很有可能会出现无法收敛的情况。

为了解决这一问题,在迭代计算时,对于内方位元素、外方位元素的直线元素和角元素、光学畸变系数分开提取其改正值的最大值,在这里对于相机的内方位元素改正数  $(\Delta f, \Delta x_0, \Delta y_0)$  设置限差  $\Delta_1$ ,对于相机的畸变系数改正数  $(\Delta \kappa_1, \Delta \kappa_2, \Delta \kappa_3, \Delta p_1, \Delta p_2)$  设置限差  $\Delta_2$ ,对于外方位元素中直线元素改正数  $(\Delta X_s, \Delta Y_s, \Delta Z_s)$ ,设置限差  $\Delta_3$ ,外方位元素中角元素改正数  $(\Delta \phi, \Delta \omega, \Delta \kappa)$  设置限差  $\Delta_4$ 。并用这些最大值与设置的不同限差进行比较,对于提前达到限差要求的参数待求值在下一步迭代时不做改正,没有达到限差要求待求值需要加上改正值再进行迭代。通过改进,可以在迭代过程中改变迭代收敛条件,提前结束迭代,不仅会提高迭代计算部分的算法效率,也能使得整体平差的改正值收敛效果更好。

## 3 相机标定的实验验证

为验证本文所提的相机标定方法的可行性,

本文设计了相关实验。三维室内模型场实拍图如图 3 所示,首先在室内设计三维模型场,总共布设 132 个标志点,且标志点较为均匀地分布在非同一平面上(图 3a),标志点放大图如图 3b 所示。采用高精度全站仪对标志点的物方坐标进行测量,用标志点间距大致相似的限制条件对于量测结果进行筛选,最后选择出量测最为精准的结果。

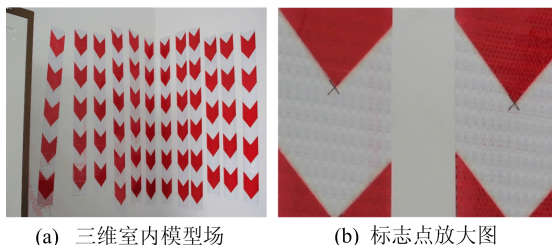


图 3 三维室内模型场实拍图

本文采用同一台数码相机对模型场拍摄多张像片,间隔均为 0.1 m,提前对图像进行预处理,使得图像灰度差异更明显。利用 FAST 算法实现像点像素坐标的半自动化提取,选取的标志点具有统一的特征,针对标志点特征进行阈值的调整。选取全局阈值时,根据标志点的自身特征及其图像预处理后的效果,进行不同阈值的实验,最后选取的阈值为 0.06。判定过程中的参数  $n$  选取为 12,此时通过该算法可以排除大量的非特征

点。左、右像片像点坐标获取如图 4 所示,提取的特征点效果(图 4a)再进行同名像点的坐标匹配(图 4b)。

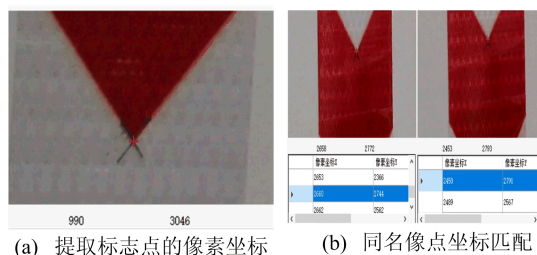


图 4 左、右像片像点坐标获取

按照相机标定流程,对单张像片进行直接线性变换解算求得相机参数的初值并代入附有基线长度约束条件的双像光束法平差模型中进行解算,在迭代运算时,采取第 2 节提到的分类阈值的方法帮助优化迭代运算。

得到相机的内、外参数及畸变系数,其中左、右像片相机内参数相同,包括焦距  $f$ 、像主点坐标  $(x_0, y_0)$ 、畸变系数包含  $(\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, p_1, p_2)$ ;左像片外参数包括直线元素  $(X_{s1}, Y_{s1}, Z_{s1})$ 、角元素  $(\phi_1, \omega_1, \kappa_1)$ ;右像片外参数包括直线元素  $(X_{s2}, Y_{s2}, Z_{s2})$ 、角元素  $(\phi_2, \omega_2, \kappa_2)$ 。其中是否附有基线长度约束条件的标定结果对照见表 1 所列。

表 1 附有基线长度约束条件的标定结果对照

约束条件	$f/mm$	$x_0/mm$	$y_0/mm$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$p_1$	$p_2$
无	24.885 7	-0.093 1	0.027 2	$1.741 0 \times 10^{-4}$	$1.557 1 \times 10^{-7}$	$-3.017 8 \times 10^{-9}$	$6.364 5 \times 10^{-5}$	$-2.008 1 \times 10^{-6}$
有	24.927 1	-0.110 5	0.021 0	$1.850 4 \times 10^{-4}$	$-9.251 2 \times 10^{-8}$	$-1.839 0 \times 10^{-9}$	$8.382 4 \times 10^{-5}$	$5.038 0 \times 10^{-6}$

约束条件	$X_{s1}/m$	$Y_{s1}/m$	$Z_{s1}/m$	$\phi_1/rad$	$\omega_1/rad$	$\kappa_1/rad$	$X_{s2}/m$	$Y_{s2}/m$	$Z_{s2}/m$	$\phi_2/rad$	$\omega_2/rad$	$\kappa_2/rad$
无	0.598 6	-0.147 1	-0.192 1	1.131 9	0.132	-0.010	0.609 2	-0.147 7	-0.092 6	1.377 5	0.136	-0.109
有	0.593 2	-0.147 8	-0.192 2	1.382 1	0.131	-0.010	0.606 9	-0.148 6	-0.093 1	1.377 3	0.136	-0.109

相机的标定精度可以通过残差和中误差来衡量,标定精度越高,残差越小,中误差也相应越小,为判断附有摄影基线约束条件的相机标定的精度,给出了对比实验的观测值残差最大值和观测值中误差的对照,见表 2 所列。

表 2 是否附有约束条件的标定结果精度对照 单位:mm

评估指标	不含约束条件	附有约束条件
残差最大值	-0.029 2	-0.022 5
中误差	0.007 3	0.006 4

其中附有摄影基线约束条件的相机标定结果的残差分布如图 5 所示。由表 2 可知,本文提出的算

法对于平差的精度有所提高,其中误差减小了 12.3%。

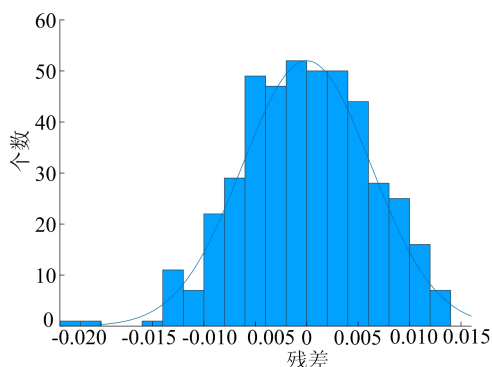


图 5 附有约束条件的相机标定结果的残差分布

由图 5 可知,该算法计算所得的残差分布基本符合正态分布,其残差值可能受随机误差的影响。

#### 4 结 论

本文提出一种联合 FAST 算法和双像光束法平差的相机标定方法。首先通过 FAST 算法自动提取像片标志点的像素坐标,并基于人工辅助方式纠正少量错误点;然后利用直接线性变换法解得相机的内、外参数及畸变系数的初值;最后将该初值代入将基线长度约束条件纳入平差模型考虑的光束法平差计算中进行解算,并采用分类阈值的方法提高模型迭代计算的收敛效率,获得更高精度的相机内、外参数及畸变系数。结果表明该方法的精度高于普通的双像光束法平差,具有较快的收敛速度,可以应用于高精度的相机标定工作。

#### [参 考 文 献]

- [1] ABDEL-AZIZ Y I. Photogrammetric potentials of non-metric cameras[D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1974.
- [2] 张永军,张祖勋,张剑清. 利用二维 DLT 及光束法平差进行数字摄像机标定[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(6): 566-571.
- [3] ZHAO Z, YE D, ZHANG X, et al. Improved direct linear transformation for parameter decoupling in camera calibration[J]. Algorithms, 2016, 9(2): 31.
- [4] BARONE F, MARRAZZO M, OTON C J. Camera calibration with weighted direct linear transformation and anisotropic uncertainties of image control points[J]. Sensors, 2020, 20(4): 1175.
- [5] 付兵杰,赵双明,喻国荣,等. 一种无需控制信息的智能手机自检校方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(2): 268-275, 282.
- [6] ZHANG C S, ZHU S H, ZHANG Y F, et al. GPS-supported bundle adjustment method of UAV by considering exposure delay[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(5): 565.
- [7] DABEER O, DING W, GOWAIKER R, et al. An end-to-end system for crowdsourced 3D maps for autonomous vehicles: The mapping component[C]//2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver: IEEE, 2017: 634-641.
- [8] YANG S, SONG Y, KAESS M, et al. Pop-up slam: Semantic monocular plane slam for low-texture environments[C]//2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Daejeon: IEEE, 2016: 1222-1229.
- [9] 赵帅华,李言言,曹健,等. 基于 BFGS 修正的高斯牛顿光束法平差解算方法[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2020, 56(6): 1013-1019.
- [10] LEPETIT V, FUA P. Keypoint recognition using randomized trees[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(9): 1465-1479.
- [11] 贾迪,朱宁丹,杨宁华,等. 图像匹配方法研究综述[J]. 中国图像图形学报, 2019, 24(5): 677-699.
- [12] 张绍荣,张闻宇,李云,等. 基于 FAST 角点和 FREAK 描述符改进的无人机景象匹配算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(4): 102-110.
- [13] ROSTEN E, DRUMMOND T. Machine learning for high-speed corner detection [C]//Computer Vision-ECCV 2006: 9th European Conference on Computer Vision. Heidelberg: Springer, 2006: 430-443.
- [9] ZHOU Q, WANG J Y, XIAO Y. Identification and illustration of relationships between produced gas and water in marcellus under different spatial and temporal domains through data-driven analytics-Nonparametric model [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 184: 106434.
- [10] CHEN P, FIALLOS-TORRES M, XING Y, et al. Water intrusion characterization in naturally fractured gas reservoir based on spatial DFN connectivity analysis[J]. Energies, 2020, 13(16): 4235.
- [11] 查文舒,李道伦,沈路航,等. 基于神经网络的偏微分方程求解方法研究综述[J]. 力学学报, 2022, 54(3): 543-556.
- [12] SHEN L H, LI D L, ZHA W S, et al. Surrogate modeling for porous flow using deep neural networks[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 213: 110460.
- [13] LIU X L, LI D L, YANG J, et al. Automatic well test interpretation based on convolutional neural network for infinite reservoir[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 195: 107618.
- [14] LI D L, WANG Z Q, ZHA W S, et al. Predicting production-rate using wellhead pressure for shale gas well based on Temporal Convolutional Network[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 216: 110644.
- [15] WANG A, LIU D, ZHAO W. An expression detection technique based on multi-input convolutional neural network for incomplete face images[C]//2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Design (AIID). [S. l.]: IEEE, 2021: 211-216.

(责任编辑 吴 亮)

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 832 页)