

光学学报

基于亚像素边缘检测的高精度相机标定方法

娄群¹, 吕钧滢¹, 文立华^{1*}, 校金友^{1**}, 张光喜², 侯晓³

¹西北工业大学航天学院, 陕西 西安 710072;

²西安航天复合材料研究所, 陕西 西安 710025;

³中国航天科技集团有限公司, 北京 100048

摘要 在许多实际应用场景中, 标定图像不清晰、靶标检测精度低常常导致相机标定精度不足, 这制约了测量精度的提高。针对该问题, 提出一种基于亚像素边缘检测的双目相机标定方法。首先, 利用自适应双阈值的 Canny 算子获取靶标标识点的整像素边缘初值。然后, 以整像素边缘初值为中心, 根据局部区域面积效应估计非连续性边缘模型的二阶边缘参数, 并对亚像素边缘点集进行椭圆拟合, 得到靶标标识点的准确位置。最后, 通过标识点的排序位置矫正获取用于求解标定参数的标识点检测点集, 实现了复杂环境下相机的高精度标定。典型标定场景的测试实验结果表明, 相较于现有方法, 所提方法对常规环境的标定精度提升了 23%, 对低对比度、低相对分辨率的高温烘箱环境的标定精度提升了 68%。

关键词 测量; 相机标定; 数字图像相关; 亚像素边缘检测; 靶标检测精度; 局部区域面积效应

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2012002

High-Precision Camera Calibration Method Based on Sub-Pixel Edge Detection

Lou Qun¹, Lü Junhao¹, Wen Lihua^{1*}, Xiao Jinyou^{1**}, Zhang Guangxi², Hou Xiao³

¹School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

²Xi'an Aerospace Science Research Institute, Xi'an 710025, Shaanxi, China;

³China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China

Abstract In many practical application scenarios, the camera calibration is not highly accurate due to unclear calibration images and low target detection accuracy, which limits the improvement of measurement accuracy. To solve this problem, a binocular camera calibration method based on sub-pixel edge detection is proposed. The initial integer-pixel edge values of the target identification points are obtained by an adaptive double-threshold Canny operator. In addition, the initial integer-pixel edge values are taken as the center to estimate the second-order edge parameters of a discontinuous edge model based on the partial area effects, and ellipse fitting on the set of sub-pixel edge points is performed to obtain the accurate position of the target identification points. Finally, the set of the identification points used to solve the calibration parameters is obtained by correcting the sorting position of these points, which thus achieves the high precision calibration of cameras under complex environments. The test experiments on typical calibration scenarios show that, compared with the existing methods, the proposed method can improve the calibration accuracy by 23% in a conventional environment and 68% in a high-temperature oven environment with low contrast and relative resolution, respectively.

Key words measurement; camera calibration; digital image correlation; sub-pixel edge detection; target detection accuracy; partial area effect

1 引言

数字图像相关测试方法^[1-4]因其非接触性、全场性等优点, 已被广泛应用于医疗、土木和航空航天等领域

中, 其测试精度往往由图像的匹配精度和相机的标定精度共同决定, 相机的标定精度将直接影响最终的测试精度。低对比度、低相对分辨率(单位为 pixel/mm)和模糊边缘等因素会严重影响相机标定的精度, 传统

收稿日期: 2022-03-01; 修回日期: 2022-04-07; 录用日期: 2022-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(U1837601, 52090051)

通信作者: *lhwen@nwpu.edu.cn; **xiaojy@nwpu.edu.cn

相机标定方法无法满足测试精度要求。因此,为确保数字图像相关方法的测量精度满足要求,研究相机标定过程具有重要意义。

目前相机标定技术主要分为三大类:相机自标定^[5-6]、相机主动视觉标定^[7]和靶标相机标定^[8]。自标定方法通过建立图像上对应特征点的多元方程,求解得到相关标定参数,其原理简单,但精度低、鲁棒性差。主动视觉标定方法根据相机运动轨迹进行标定参数的求解,需要明确获取相机的运动轨迹,对实验设备要求较高。靶标相机标定法需要利用制作的特定靶标标识物进行标定,标定物上存在已知尺寸的特征点,其标定精度较高、鲁棒性好,且对测试环境要求并不苛刻。

数字图像相关测试技术对标定精度要求高,且在整个测试过程中需对相机位置进行严格固定,故目前广泛采用的是靶标相机标定法,其中最具代表性的是 Zhang^[8]在 2000 年提出的一种针对棋盘格标定板的灵活相机标定方法。为进一步提高标定精度和标定效率,近年来众多学者分别将各类优化搜索算法^[9]、K-SVD 等机器学习模型^[10]和神经网络模型^[11-12]应用于相机标定模型中,对标定的参数优化方面进行了一定程度的改进。

对于复杂环境下的标定过程,影响标定精度的主要原因是标定图像噪声高、质量差,因此实现高精度标定更迫切要做的是提高靶标检测精度。圆形标定板是一种常用的标定靶标,为提高靶标中心的检测精度,段振云等^[13]提出了一种边缘位置补偿方法,从而减轻光照对中心检测的影响。卢晓冬等^[14]通过降低图像畸变引起的偏心误差来提高椭圆靶标的检测精度。Maalek 和 Lichti^[15]利用基于共焦双曲线的椭圆拟合来提高靶标中心点的拟合精度。然而,以上方法均是在成功检测靶标中心初值或边缘信息的基础上对中心坐标进行补偿优化或精确拟合的,因此若无法获得精确的初值信息,后续算法便无从谈起。现有的初始靶标检测均为基于图像质心或梯度的处理方法,当标定图像质量下降、靶标相对分辨率低和边缘特征不明显时,靶标检测精度往往无法满足测试需求,进而导致标定误差明显提高。

为提高双目相机的标定精度,本文从提升靶标边缘检测精度的角度出发,提出了一种基于亚像素边缘检测的双目相机标定方法。首先,利用传统边缘检测算法和标识点的形态学特征获取标定板上每一标识点的整像素级边缘初值。然后,根据边缘初值的局部区域面积效应对每一初值进行亚像素级细化,从而得到精确的亚像素级标识点的中心坐标。最后,利用张氏标定法获取相机的内外参数,完成相机标定过程。

2 相机标定原理

相机标定的目的是求解由三维空间点(单位为 mm)转换为二维图像点(单位为 pixel)的成像模型所涉及的参数。本节简要回顾了标准相机的标定方法,并指出复杂环境标定中可能影响标定精度的因素。

在大多数的测试应用中,测量相机可以视为理想的针孔相机,其成像模型如图 1 所示,其中 (u_0, v_0) 为相机的主点坐标, p 为世界坐标系下点 P_w 在图像坐标系下的对应点, p' 为图像坐标系下的另一点。给定在世界坐标系 $o_w-x_w y_w z_w$ 下的任意三维点 $P_w=[x_w y_w z_w]$,其在相机坐标系 $o_c-x_c y_c z_c$ 下的点为 (x_c, y_c, z_c) 。同时,通过相机的光学中心投影,并在图像坐标系 o_i-uv 上形成图像点 $P_i=[u v]$ 。一般地,从 P_w 到 P_i 的投影变换过程可以表示为

$$\begin{cases} s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K [R \quad T] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \\ K = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (1)$$

式中: s 为任意的比例因子; K 为由相机坐标系 $o_c-x_c y_c z_c$ 投影到图像坐标系 o_i-uv 的内参数矩阵; $[R \quad T]$ 为由世界坐标系 $o_w-x_w y_w z_w$ 变换到相机坐标系 $o_c-x_c y_c z_c$ 的外参数矩阵,其中 R 为旋转矩阵、 T 为平移矩阵; f_x 和 f_y 为沿 x 方向和 y 方向以 pixel 为单位的焦距; (c_x, c_y) 为相机主点坐标; γ 为描述两图像轴间倾斜度的系数。

在实际测试中,还应该考虑透镜的畸变问题。透镜的畸变模型一般分为径向畸变和切向畸变。假设理想图像点的坐标为 (u, v) ,考虑畸变后对应点坐标 (u_d, v_d) 的表达式为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2p_1 uv + p_2(r^2 + 2u^2) \\ p_1(r^2 + 2v^2) + 2p_2 uv \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $r^2 = u^2 + v^2$; k_1, k_2, k_3 为径向畸变参数; p_1, p_2 为切向畸变参数。为了获取针孔成像模型参数和畸变模型参数,以重投影误差最小为目标来优化求解标定参数^[16],即

$$\arg \min_{(K, D, R_k, T_k)} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m \| p_{kl} - \hat{p}(K, D, R_k, T_k, P_l) \|^2, \quad (3)$$

式中: k 为图像数目; l 为标识点数目; p_{kl} 为图像像素坐标系下由靶标特征点检测算法得到的位置点; \hat{p} 为由投影方程得到的位置点; $D(k_1, k_2, k_3, p_1, p_2)$ 为相机内部参数矩阵; R_k 和 T_k 分别为第 k 张图像的旋转矩阵和平移矩阵; P_l 为第 l 个靶标特征点的世界坐标。采用 Levenberg-Marquardt 优化算法^[17]对式(3)进行迭代,求解出标定参数。

由式(3)的优化函数表达式可知,在标定模型建立无误的条件下,相机的标定精度主要由给定的已知点 P_l 和点 p_{kl} 的精确度决定。前者取决于靶标标定板的制造精度,在标定过程中已无法改变(本文采用的标定

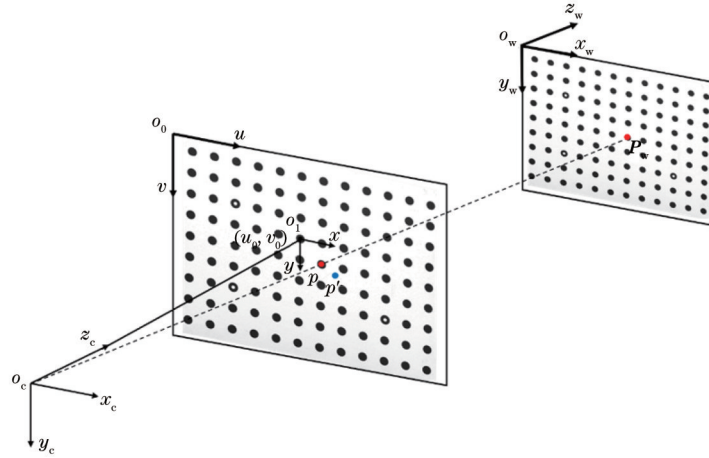


图 1 理想针孔相机模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ideal pinhole camera model

板的制造误差为 0.01 mm)。\$p_{kl}\$ 点的检测受制于不同的测试环境,当标定环境复杂时,靶标标定板的图像采集将不可避免地出现相对分辨率较低、靶标特征点成像不清晰等问题,这些都会制约 \$p_{kl}\$ 点的检测精度。因此,为减小相机标定的重投影误差,提升 \$p_{kl}\$ 点的检测精度至关重要。

3 基于亚像素边缘检测的标定方法

本章从提升靶标检测精度的角度出发,提出了一种基于亚像素边缘检测的双目相机标定方法,可有效提高 \$p_{kl}\$ 点的检测精度。整个标定过程分为靶标点的

整像素边缘获取、亚像素边缘估计和靶标点位置排序矫正三个步骤,分别在 3.1~3.3 节进行了详细介绍。最后,3.4 节进行了总结。

3.1 靶标点的整像素边缘获取

获取靶标标识点的整像素边缘的目的是快速识别标定板的位置,为亚像素的边缘检测提供计算初值,从而提高检测效率。整像素边缘的检测过程如图 2 所示。为权衡整像素边缘的检测精度与检测效率,本节先采用 Canny 算子获取包含背景与标识点的混合边缘图像,再根据圆形靶标的几何特征,对混合边缘进行筛选排除,最终实现了对靶标标识点的整像素边缘获取。

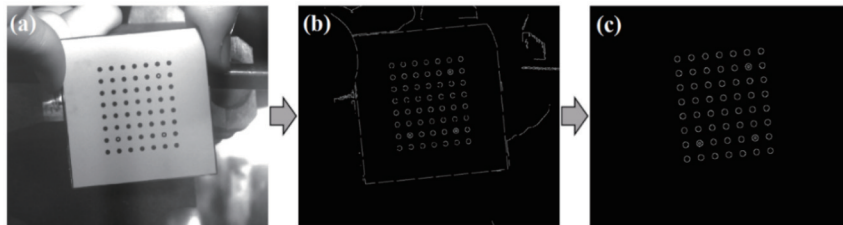


图 2 靶标标识点的整像素检测过程。(a)原始标定图片;(b)混合边缘;(c)靶标标识点边缘

Fig. 2 Integer pixel detection process of target marking points. (a) Original calibration picture; (b) mixed edges; (c) edges of target marking points

一般的边缘检测算法采用单阈值来滤除噪声或亮度变化引起的小梯度值,从而识别出真实边缘的较大梯度值。Canny 算法采用双阈值,即同时采用低阈值 \$C_1\$ 和高阈值 \$C_2\$ 来区分边缘像素。以往的实际应用表明,双阈值判断方法的鲁棒性要高于单阈值法^[18]。然而,双阈值参数的设定往往是根据人工经验选取的,故难以应对不同检测背景下自适应阈值的需求。为满足 Canny 算子在检测过程中的自适应阈值需求,将检测算子的双阈值设定为如下关系,即

$$\begin{cases} 2C_1 = C_2 \\ C_2 = \text{Otsu}(I) \end{cases} \quad (4)$$

式中:\$\text{Otsu}(\cdot)\$ 为由最大类间方差确定单阈值的函数;\$I\$ 为待进行边缘检测的标定图像。

由式(4)的自适应阈值判断方法得到的检测图像如图 2(b)所示,其中包含了待识别的标识点边缘和复杂的背景边缘。为识别出靶标标识点的边缘,利用椭圆标识点的形态学特征设计几何特征判别式,即

$$\begin{cases} A_b < A_{Tr} < A_a \\ e < 0.7 \end{cases} \quad (5)$$

式中:\$A_a\$ 和 \$A_b\$ 分别为以检测椭圆的长轴和短轴为直径形成的标准圆的面积;\$A_{Tr}\$ 为由检测边缘所围成的闭合区域的面积;\$e\$ 为椭圆的离心率。

经过以上判别方法得到的标识点的整像素边缘如图 2(c)所示,记为 \$p^{(0)}\$,其可为下一步的亚像素边缘估计提供关键初值。

3.2 亚像素边缘估计

本节的亚像素检测方法受 Javed 等^[19]的研究思路启发,利用基于局部区域面积效应的边缘检测算法开展了对靶标标识点的亚像素边缘检测。圆形标识点的

亚像素边缘估计过程如图 3 所示。在每一个局部小区内,椭圆的局部轮廓可近似于二次函数,根据边缘局部区域面积效应可估计非连续性边缘模型的二阶边缘参数,从而求解得到表征边缘的二次函数。

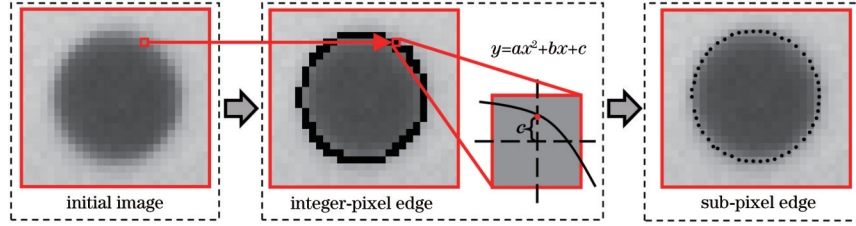


图 3 圆形特征的亚像素边缘估计方法

Fig. 3 Sub-pixel edge estimation method for circular features

边缘点的局部子区示意图如图 4 所示。以获取的每一个整像素边缘点为中心,假设局部边缘线为二次函数,其表达式为 $y = ax^2 + bx + c$,其中 a, b, c 分别为

二次曲线的系数。因此,根据局部子区的强度特征和面积效应即可得到局部边缘线的近似表达式,从而实现边缘坐标的亚像素估计。

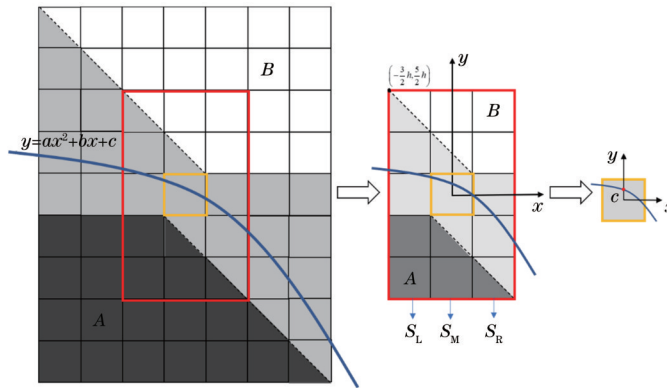


图 4 边缘线的求解过程

Fig. 4 Solution process of edge line

如图 4 所示,设二次边缘线两侧的强度值为 A 和 B ,且假设 A 和 B 已知。若像素点未被边缘线贯穿,则该像素点的强度即为其灰度值。若像素点被边缘线贯穿,则被贯穿的像素点的强度的计算公式为

$$G(i, j) = B + \frac{A - B}{h^2} E_{i, j}, \quad (6)$$

式中: $G(i, j)$ 为边缘点 (i, j) 处的替代灰度值; h 为边缘边的长度,一般取 1; $E_{i, j}$ 为边缘点 (i, j) 内边缘线下方的面积。

为高效求解二次边缘线的表达式,在目标边缘点局部取一个满足求解要求的最小子区,即大小为 5×3 的窗口^[20],如图 4 所示。设 S_L, S_M, S_R 分别为子区窗口

中左、中、右三列像素的强度之和,其表达式为

$$\begin{cases} S_L = \sum_{n=j-2}^{j+2} F_{i-1, n} = 5B + \frac{A - B}{h^2} E_L \\ S_M = \sum_{n=j-2}^{j+2} F_{i, n} = 5B + \frac{A - B}{h^2} E_M \\ S_R = \sum_{n=j-2}^{j+2} F_{i+1, n} = 5B + \frac{A - B}{h^2} E_R \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $F_{i, n}$ 为坐标 (i, n) 位置处的像素点强度; E_L, E_M, E_R 分别表示左、中、右列二次边缘线下方的面积,三者的表达式为

$$\begin{cases} E_L = \int_{-3h/2}^{-h/2} (ax^2 + bx + c + 5h/2) dx = ch - bh^2 + \frac{13}{12} ah^3 + \frac{5}{2} h^2 \\ E_M = \int_{-h/2}^{h/2} (ax^2 + bx + c + 5h/2) dx = ch + \frac{1}{12} ah^3 + \frac{5}{2} h^2 \\ E_R = \int_{h/2}^{3h/2} (ax^2 + bx + c + 5h/2) dx = ch + bh^2 + \frac{13}{12} ah^3 + \frac{5}{2} h^2 \end{cases}, \quad (8)$$

基于局部区域面积特征的二阶边缘系数的表达式为

$$\begin{cases} a = \frac{S_L + S_R - 2S_M}{2(A - B)} \\ b = \frac{S_R - S_L}{2(A - B)} \\ c = \frac{2S_M - 5(A + B)}{2(A - B)} - \frac{1}{12}a \end{cases} \quad (9)$$

求解得到边缘线方程后即可将整像素级边缘坐标细化为亚像素级,从而提高标识点的边缘检测精度。若设细化前边缘点的坐标位置为 $p^{(0)}(x, y)$, 则边缘细化后边缘点的坐标位置为 $p(x, y + c)$ 。

强度值 A 和 B 可由窗口相对于中心像素点的 3 个像素点的强度计算得到, 即

$$\begin{cases} A = \frac{1}{3}(G_{i-1,j-1} + G_{i-1,j-2} + G_{i,j-2}) \\ B = \frac{1}{3}(G_{i,j+2} + G_{i+1,j+2} + G_{i+1,j+1}) \end{cases} \quad (10)$$

至此,可获得具有亚像素精度的边缘点,如图 3 所示。进一步地,通过检测到的椭圆边缘点进行椭圆拟合,得到的椭圆中心点即为该靶标标识点的检测位置。

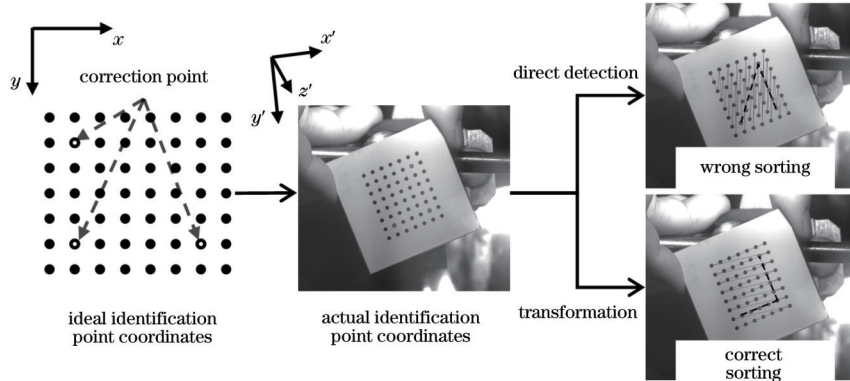


图 5 标识点的坐标位置矫正

Fig. 5 Coordinate position correction of marking points

为求解仿射变换矩阵 H , 以图 5 所示的标定板为例, 标定板上圆形标识点为 7×8 矩形排布, 其中有三个标识点为内外同心的特殊标识点, 作为排序位置的矫正点。对应理想标识点坐标系下的位置分别为 $(2, 2)$ 、 $(6, 2)$ 和 $(6, 7)$ 。利用这三个矫正点构建图像坐标系与理想标识点坐标系间的对应关系^[21], 即

$$\begin{bmatrix} x_1^{(0)} & y_1^{(0)} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_1^{(0)} & y_1^{(0)} & 1 \\ x_2^{(0)} & y_2^{(0)} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_2^{(0)} & y_2^{(0)} & 1 \\ x_3^{(0)} & y_3^{(0)} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_3^{(0)} & y_3^{(0)} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^{(0)} \\ Y_1^{(0)} \\ X_2^{(0)} \\ Y_2^{(0)} \\ X_3^{(0)} \\ Y_3^{(0)} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中: $(x_i^{(0)}, y_i^{(0)}) (i = 1, 2, 3)$ 和 $(X_i^{(0)}, Y_i^{(0)}) (i = 1, 2, 3)$ 分别为三个矫正点在图像坐标系和理想标识点坐标系

重复所有标定图像中的靶标点检测过程, 即可得到用于标定计算过程的图像检测点。

3.3 标识点的坐标位置矫正

由 3.2 节直接检测得到的边缘点集是在图像坐标系下得到的检测位置。如图 5 所示, 当采集的靶标标定板图像出现倾斜、旋转等现象时, 检测的边缘点集的排序位置与理想标识点坐标下的排序位置不匹配, 导致在进行式 (3) 中的标定参数估计时, 点 p_{i1} 和点 p_{i2} 难以正确对应, 进而引起排序混乱。

为此, 本节通过构建仿射变换矩阵 H , 将每张标定图像检测得到的边缘点集 p^m 变换到理想靶标坐标系下, 得到新的点集 \hat{p}^j 和排序规则 j , 该过程可以描述为

$$\begin{cases} \hat{p}^j = H \cdot p^m \\ H = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 & a_5 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $a_0 \sim a_5$ 为变换矩阵 H 的元素。

然后, 对边缘点集 p^m 按照排序规则 j 进行矫正。最终, 得到对应的正确排序点集 p^j 。即 $p^j = \text{sort}(\hat{p}^j, p^m)$, 其中 $\text{sort}(\cdot)$ 表示利用新排序规则矫正边缘点集的函数。

中的坐标。求解此方程即可得到仿射变换矩阵的系数。

3.4 基于亚像素边缘检测的标定总结

基于亚像素边缘检测的标定方法主要分为三个步骤: 靶标标识点的整像素边缘获取、亚像素边缘估计和标识点的坐标位置矫正。具体实施流程如图 6 所示, 即:

1) 通过传统边缘检测方法获取全幅标定图像的边缘信息, 根据选用标定板的规格和标识点的形态学特征对非标识点的边缘信息进行筛选排除, 同时对标定板上两种不同尺寸的标识点进行分类, 从而有效获取标识点的整像素边缘点集 $p^{(0)}$;

2) 利用整像素级边缘的局部区域面积特征对标识点边缘进行二阶拟合, 从而得到亚像素级边缘坐标, 经过椭圆拟合后可获取亚像素的边缘点集 p^m ;

3) 通过靶标标定板上的三个特殊矫正点, 构建仿

射变换矩阵 H , 并将检测的边缘点集 p^m 变换到理想靶标坐标下, 形成点集 p^j 和排序规则 j , 最后得到对应的正确排序点集 p^i ;

4) 重复单张图像的标定检测过程, 对多张标定图像进行标识点检测, 得到已知的图像检测点集 p_{ij} , 完成式 (3) 的标定计算。

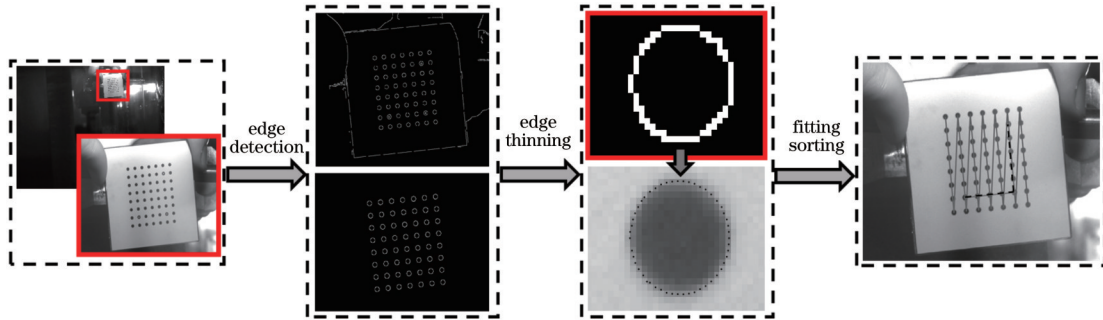


图 6 所提标定方法总结

Fig. 6 Summary of proposed calibration method

4 实验与分析

所提的基于亚像素边缘检测的相机标定方法从靶标检测的角度提升标定精度, 为数字图像相关的高精度测量提供了一种高鲁棒性的标定方法。本章设计了两种典型场景下的相机标定实验, 通过与三种传统方法对比的方式对所提方法进行了实验验证。

高温烘箱因其环境复杂, 已经成为制约结构变形测试的关键因素。由于烘箱内部存在光照不均、标定板较小等问题, 故会导致标定图像质量下降, 使得标定误差明显升高。因此, 为验证所提方法的标定精度, 将常规环境和低对比度、低相对分辨率的高温烘箱环境作为两种典型场景进行实验分析。

4.1 实验设置

标定实验的测试系统主要由两种不同规格的圆形标定板、双目工业面阵相机 (杭州海康威视数字技术股份有限公司, MV-CA030-10GC) 和计算机组成。每组

实验的标定图像均为 8 组。两种规格的标定板如图 7 所示: 标定板 1 为 9×12 矩形均匀排布, 两相邻圆形标记点圆心相距 10 mm, 其中用于求解仿射变换矩阵的三个特殊标识点位置分别为 (3, 3)、(7, 3) 和 (7, 10); 标定板 2 为 7×8 矩形均匀排布, 两相邻圆形标记点圆心相距 4 mm, 其中用于求解仿射变换矩阵的三个特殊标识点位置分别为 (2, 2)、(6, 2) 和 (6, 7)。每组标定图像均利用工业相机进行同步采集。为确保相机优化参数的正常求解, 标定图像的采集对拍摄角度有一定的要求。所提方法针对的是小倾角实验条件, 故倾角引入的误差可忽略不计。

4.2 常规环境标定结果分析

在常规条件下利用标定板 1 进行标定测试。分别利用全局阈值质心检测方法、基于分水岭图像分割的质心检测方法、传统椭圆拟合检测方法和所提方法对相机采集的 8 组标定图片进行标定, 其中一组标定图片如图 8 所示。

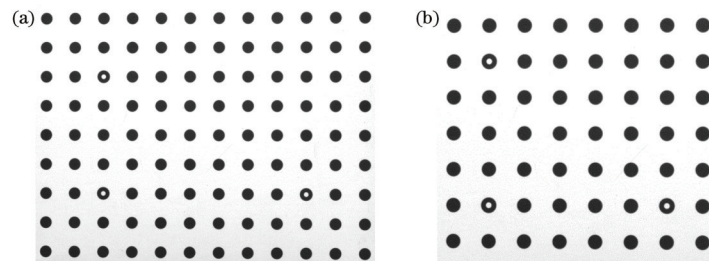


图 7 两种不同规格标定板的尺寸图。(a) 标定板 1; (b) 标定板 2

Fig. 7 Size drawings of two different specifications of calibration board. (a) Calibration board 1; (b) calibration board 2

图 8 所示的实验结果表明, 在常规条件下, 4 种检测方法均可达到理想的标定结果。由图 9 可以发现: 当利用全局阈值质心检测方法进行双目相机标定时, 综合重投影误差为 0.0860 pixel; 当利用基于分水岭图像分割的质心检测方法进行双目相机标定时, 综合重投影误差为 0.08482 pixel; 当利用传统椭圆拟合检测方法进行双目相机标定时, 综合重投影误差为 0.0758 pixel; 当利用所提方法进行双目相机标定过程

时, 综合重投影误差为 0.0664 pixel。

图 10 为利用 4 种不同靶标检测方法进行标定的重投影误差对比图。可以看出, 针对每一组图像, 两种基于质心的标定方法和传统椭圆拟合检测方法均劣于所提方法。所提方法的平均标定精度与两种质心方法和传统椭圆拟合检测方法相比, 精度分别提高了 23%、22% 和 12%, 表明所提方法可以有效进行双目相机的标定, 且标定精度优于目前常用的标定方法, 证实了所

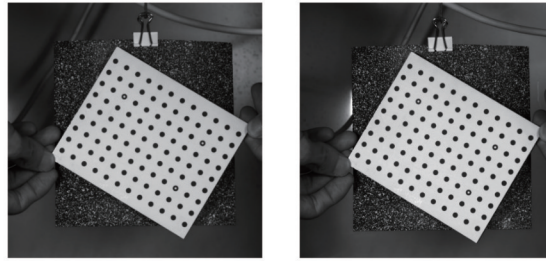


图 8 常规环境下的标定图片
Fig. 8 Calibration pictures in normal environment

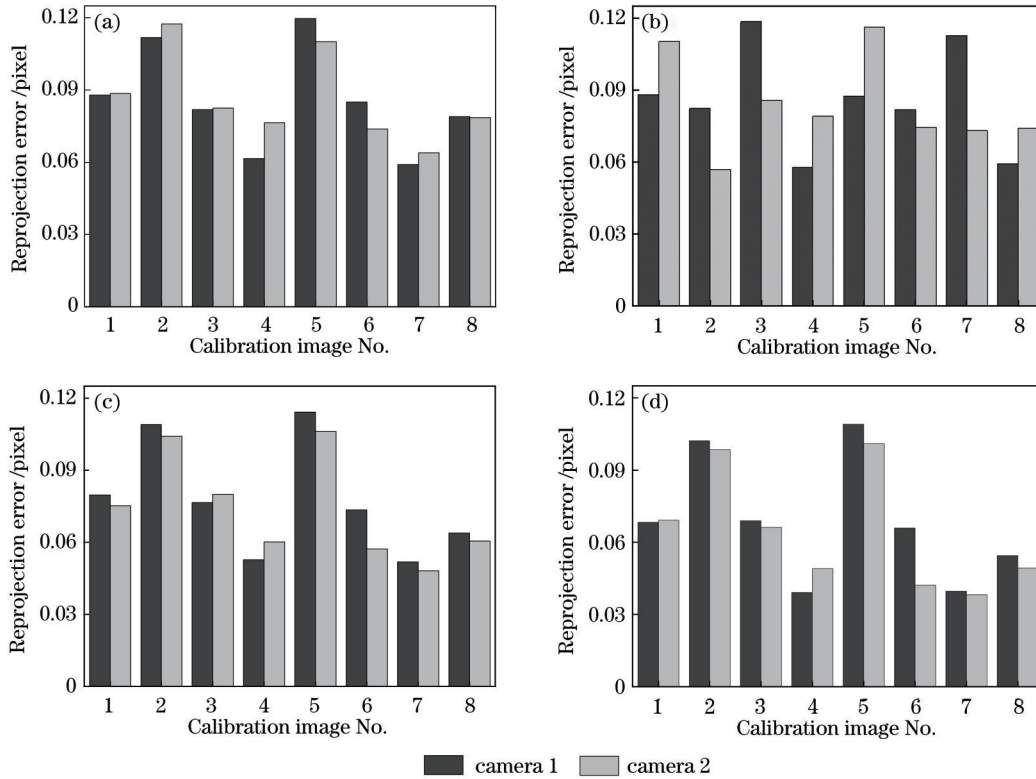


图 9 常规环境下 4 种方法标定结果。(a)全局阈值质心检测方法;(b)基于分水岭图像分割的质心检测方法;(c)传统椭圆拟合检测方法;(d)所提方法

Fig. 9 Calibration results of four methods in normal environment. (a) Global threshold centroid detection method; (b) centroid detection method based on watershed image segmentation; (c) traditional ellipse fitting detection method; (d) proposed method

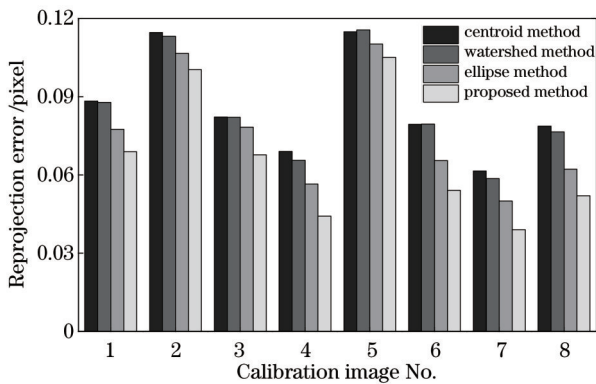


图 10 常规环境下 4 种不同检测方法标定结果对比

Fig. 10 Comparison of calibration results of four different detection methods in conventional environment

提方法的可靠性与准确性。

4.3 高温烘箱复杂环境标定结果分析

选用标定板 2 在高温烘箱低对比度、低相对分辨率的复杂环境下进行相机标定过程。双目相机采集到的其中一组图像如图 11 所示,可以发现环境因素导致标定图像质量明显下降。

利用 4 种标定方法进行标定,相应的结果如图 12 所示。可以发现,图像质量降低和相对分辨率下降会导致基于质心的靶标检测方法精度明显不足:全局阈值质心检测方法因无法有效检测圆形靶标中心位置而导致标定失败;基于分水岭图像分割的质心检测方法的综合重投影误差高达 0.1463 pixel,无法满足实验要求。传统椭圆拟合检测方法的综合重投影误差为 0.0732 pixel。利用所提标定方法进行标定的综合重

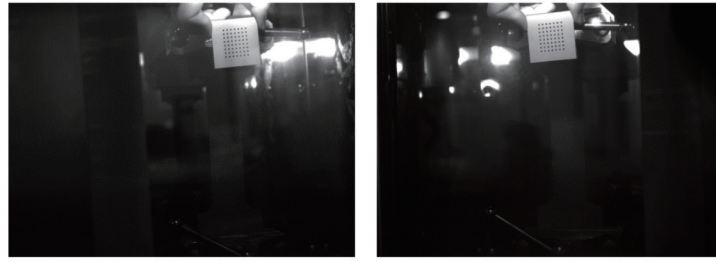


图 11 复杂环境下的标定图片

Fig. 11 Calibration pictures in complex environment

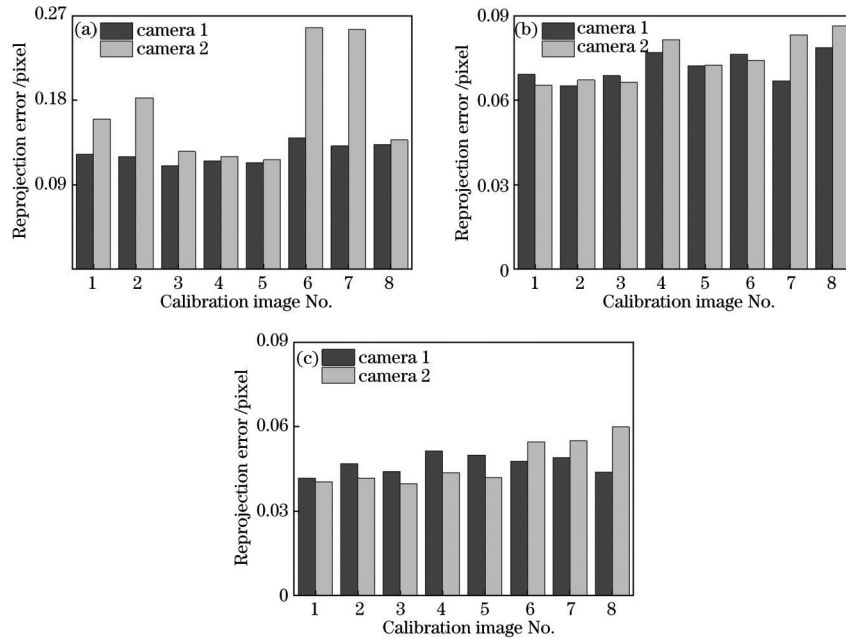


图 12 复杂环境下三种方法标定结果。(a)基于分水岭图像分割的质心检测方法;(b)传统椭圆拟合检测方法;(c)所提方法

Fig. 12 Calibration results of three methods in complex environment. (a) Centroid detection method based on watershed image segmentation; (b) traditional ellipse fitting detection method; (c) proposed method

投影误差为 0.0469 pixel, 标定误差明显降低。

图 13 为三种不同检测方法标定结果对比柱状图。可以看出, 所提方法在复杂环境下的标定精度明显优于另外两种靶标检测方法, 相较二者其标定的重投影误差分别降低了 68% 和 36%。

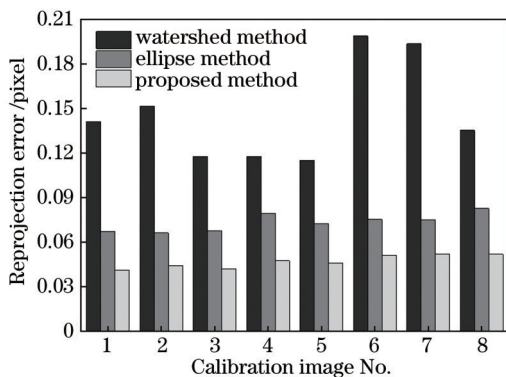


图 13 复杂环境下三种不同检测方法标定结果对比图

Fig. 13 Comparison of calibration results of three different detection methods in complex environment

通过设计高温烘箱内部低对比度、低相对分辨率环境下的标定实验, 证实了所提方法可以更好地实现复杂环境下的相机标定过程, 相较传统检测方法的标定精度有明显提高, 为双目相机的高精度标定提供了一种有效的靶标检测手段。

5 结 论

为提升靶标检测精度, 对双目相机的高精度标定方法开展了相关研究, 提出了一种基于亚像素边缘检测的双目相机标定方法。将基于局部区域面积特征的亚像素边缘检测算法引入到圆形靶标检测过程中, 有效提高了复杂背景下圆形靶标点的检测精度, 为标定优化算法提供了更为精确的坐标信息。设计了常规环境和高温烘箱复杂环境下的双目相机标定实验, 实验结果表明: 常规环境下所提标定方法的标定误差较现有检测方法降低了 23%; 高温烘箱复杂环境下所提方法的标定误差较现有检测方法降低了 68%。最终实验结果证实所提方法可以应对不同环境下的相机标定过程, 具有高精度和高稳定性的特点。

参 考 文 献

- [1] Lu H, Cary P D. Deformation measurements by digital image correlation: implementation of a second-order displacement gradient[J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40(4): 393-400.
- [2] Hild F, Roux S. Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties: a review[J]. *Strain*, 2006, 42(2): 69-80.
- [3] Sutton M A, Yan J H, Tiwari V, et al. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(10): 746-757.
- [4] 朱天天, 付中男, 张梅, 等. 基于特征匹配的数字图像相关法在变形测量中的初值估计[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(18): 181012.
Zhu T T, Fu Z N, Zhang M, et al. Initial value estimation of digital image correlation method in deformation measurement based on feature matching[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(18): 181012.
- [5] Faugeras O D, Luong Q T, Maybank S J. Camera self-calibration: theory and experiments[M]//Sandini G. *Computer vision-ECCV'92. Lecture notes in computer science*. Heidelberg: Springer, 1992, 588: 321-334.
- [6] Hartley R I. Self-calibration of stationary cameras[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 22(1): 5-23.
- [7] Yang C Y. Research on camera calibration system based on binocular stereo vision[C]//*Proceedings of the 2018 3rd International Workshop on Materials Engineering and Computer Sciences (IWMECS 2018)*, January 27-28, 2018, Jinan, China. Paris, France: Atlantis Press, 2018: 465-470.
- [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] 王道累, 孙昊, 胡松, 等. 基于天牛须搜索算法的单目相机标定方法[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2020, 34(6): 568-574.
Wang D L, Sun H, Hu S, et al. Calibration method of monocular camera based on beetle antennae search algorithm[J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2020, 34(6): 568-574.
- [10] He H, Li H Y, Huang Y B, et al. A novel efficient camera calibration approach based on K-SVD sparse dictionary learning[J]. *Measurement*, 2020, 159: 107798.
- [11] 张峰峰, 张欣, 陈龙, 等. 采用改进遗传算法优化神经网络的双目相机标定[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(12): 1423-1431.
Zhang F F, Zhang X, Chen L, et al. Binocular camera calibration based on BP neural network optimized by improved genetic algorithm[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(12): 1423-1431.
- [12] 陈文艺, 许洁, 杨辉. 利用双神经网络的相机标定方法[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(11): 20210071.
Chen W Y, Xu J, Yang H. Camera calibration method based on double neural network[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 20210071.
- [13] 段振云, 王宁, 赵文辉, 等. 基于点阵标定板的视觉测量系统的标定方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0515004.
Duan Z Y, Wang N, Zhao W H, et al. Calibration method based on lattice calibration plate in vision measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0515004.
- [14] 卢晓冬, 薛俊鹏, 张启灿. 基于圆心真实图像坐标计算的高精度相机标定方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0304008.
Lu X D, Xue J P, Zhang Q C. High camera calibration method based on true coordinate computation of circle center[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0304008.
- [15] Maalek R, Lichti D D. Automated calibration of smartphone cameras for 3D reconstruction of mechanical pipes[J]. *The Photogrammetric Record*, 2021, 36(174): 124-146.
- [16] 王国琿, 钱克矛. 线阵相机标定方法综述[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111011.
Wang G H, Qian K M. Review on line-scan camera calibration methods[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111011.
- [17] Lucas B D, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision[C]//*Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, August 24-28, 1981, Vancouver, BC, Canada. New York: William Kaufmann, 1981: 674-679.
- [18] Song R J, Zhang Z Q, Liu H Y. Edge connection based Canny edge detection algorithm[J]. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2017, 27(4): 740-747.
- [19] Javed A, Lee H, Kim B, et al. Vibration measurement of a rotating cylindrical structure using subpixel-based edge detection and edge tracking[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 166: 108437.
- [20] Trujillo-Pino A, Krissian K, Alemán-Flores M, et al. Accurate subpixel edge location based on partial area effect[J]. *Image and Vision Computing*, 2013, 31(1): 72-90.
- [21] 吕泽乾. 数字图像相关中相机标定技术及其应用拓展[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020: 14-16.
Lü Z Q. Camera calibration technology and its application in digital image correlation[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020: 14-16.