

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.055

轨旁受电弓在线监测系统高精度标定方法

刘昊瞳¹, 葛鑫鑫²

(1. 南京地铁运营有限责任公司, 江苏 南京 211135; 2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对轨旁受电弓在线检测系统测量时出现列车运营前后碳滑板测量厚度增加的问题,提出一种高精度标定方法。建立视觉系统模型并求解相关参数;针对相机标定中传统张氏标定法求解误差较大问题,提出一种基于亚像素坐标与闭环约束模型的相机标定方法,根据图像梯度信息,利用 BAZEN 方法提取标定板圆心的亚像素坐标,并构建闭环约束模型作为 LM 算法的残差模型,对标定参数进行优化。实验结果表明:该方法将相机标定精度提高约 1 倍,为后续测量提供了高精度的相机参数。

关键词:相机;标定;计算机视觉

中图分类号:U264.3⁺4 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)05-0282-05

High-precision Calibration Method for Trackside Pantograph On-line Monitoring System

LIU Haotong¹, GE Xinxin²

(1. Nanjing Subway Operation Co., Ltd., Nanjing 211135, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:To address the issue of increasing thickness of the carbon slide plate during the online system detection before and after train operation, a high-precision calibration method is proposed. A vision system model is established, and related parameters are solved. A camera calibration method based on sub-pixel coordinates and closed-loop constraint model is proposed to resolve large error in the traditional ZHANG's calibration method. According to the gradient information of the image, the sub-pixel coordinates of the circle center of the calibration plate are extracted by BAZEN method, and a closed-loop constraint model is constructed as the residual error model of the LM algorithm to optimize the calibration parameters. The experimental results show that the proposed method improves the camera calibration accuracy by about one time, and provides high-precision camera parameters for subsequent measurements.

Keywords: camera; calibration; computer vision

0 引言

随着城市发展进程的加速,城市交通问题日益严峻,而地铁凭借其运量大、准点率高、运行速度快及能耗低的特点成为各大城市解决交通问题的核心手段之一^[1]。受电弓作为车辆电气系统的一个重要组成部件,其通过碳滑板与接触网构成的弓网系统在整个车辆供能系统中起着非常关键的作用^[2]。在车辆的运行过程中,弓网接触摩擦会产生不均匀磨损,这种不均匀磨损会影响车辆正常受流,从而导致地铁运营事故的发生,造成严重的经济损失。为避免该类事件发生,保证车辆安全运营,车辆回库后都会对受电弓碳滑板的厚度进行测量^[3]。国内目前对受电弓碳滑板厚度检测的主要方式仍为人工测量,该测量方式为工作

人员使用游标卡尺来测量受电弓碳滑板的厚度值,因其测量位置通过肉眼观察进行判断,故测量结果受主观因素影响,存在较大误差^[4]。

机器视觉作为一种非接触式测量方式,凭借高精度、高效率、高安全性等优点,被广泛应用于汽车、船舶、高铁、航空航天等领域^[5-8]。相机标定作为机器视觉技术的重要步骤之一,精确的相机标定为后续视觉算法提供了必要的几何、光学参数,确保了视觉系统的功能和测量的准确性^[9-10]。现有相机标定方法主要有以下几类:传统标定法、相机自标定法、主动视觉相机标定法和基于神经网络的相机标定法^[11-12]。目前,在工业三维测量等对相机参数标定精度要求较高的领域中,广泛采用的是基于二维平面标定板的传统标定方法,其中最为经典的是 TSAI^[13]的径向约束两

第一作者简介:刘昊瞳(1997—),男,江苏南京人,助理工程师,硕士,研究方向为计算机视觉,838525004@qq.com。

步法和张氏^[14]标定法(ZHANG's calibration method)。二维平面标定板具有制作简单、精度可控的优点,因此常在工业应用中作为靶标使用。棋盘格、实心圆^[15]、同心圆环、视觉靶标^[16]等是常用的标定板图案,近年来也提出了各类新型模板^[17]。在对模糊图像进行标定时,实心圆圆心的定位精度优于棋盘格角点的提取精度,因此在高精度和自动化相机标定中以圆为标记点的二维平面标定板被广泛采用^[18-19]。

目前南京地铁宁句线使用的轨旁受电弓在线检测系统利用机器视觉技术解决了受电弓碳滑板人工检测效率低的问题,但列车运营前后碳滑板测量厚度仍存在增加的情况。针对该问题,本文使用圆阵列标定板进行相机标定,采用BAZEN等^[20]方法准确提取圆点的亚像素轮廓,从而将准确的圆心坐标作为输入参数,在此标定结果的基础上,根据双目原理构建了闭环约束模型,利用LM(levenberg-marquardt)算法^[21]对标定结果进行迭代优化。实验证明,本文方法重投影误差约为张氏标定法的50%,提高了相机的标定精度。

1 基于亚像素坐标与闭环约束模型的相机标定

1.1 基于BAZEN的亚像素轮廓提取

张氏标定法的核心是将特征三维坐标与图像二维坐标进行一一对应,从而求出相机的内参、外参与畸变参数。其中特征三维坐标已知,因此二维坐标的提取精度一定意义上决定了相机标定的精度。

本文采用圆阵列标定板,经透视变换圆在图像上呈椭圆状,需要通过拟合图像上的轮廓来获得圆心坐标。传统算法在拟合时采用像素级轮廓,拟合的圆心与真实圆心有较大误差,导致标定结果变差。故想要提高圆心拟合精度,就需要准

确提取圆点的亚像素轮廓。

亚像素轮廓通常利用轮廓的法向来确定,在法向上利用梯度重心法对轮廓点进行精确定位。

Sobel算子通过结合高斯与微分,计算图像 x 方向与 y 方向的近似梯度,每个像素点的梯度幅值与方向可根据 x 方向与 y 方向的梯度进一步计算。本文使用BAZEN方法来提取基准孔的亚像素轮廓,提取过程如下。

步骤1:计算轮廓梯度方向

根据Sobel算子计算 x 方向与 y 方向的梯度 G_x 、 G_y 和每个像素点的梯度幅值 G ,公式如下:

$$\begin{cases} G_x = \frac{\partial I(i,j)}{\partial i} \\ G_y = \frac{\partial I(i,j)}{\partial j} \\ G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \end{cases} \quad (1)$$

每个像素点的 x 方向与 y 方向梯度在计算完后,定义一个 5×5 的领域,将领域内的像素点梯度带入式(2),计算BAZEN梯度向量 (v_x, v_y) 。

$$\begin{cases} v_x = \sum_{u=i-W/2}^{i+W/2} \sum_{v=j-W/2}^{j+W/2} (G_x^2(u,v) - G_y^2(u,v)) \\ v_y = \sum_{u=i-W/2}^{i+W/2} \sum_{v=j-W/2}^{j+W/2} (2G_x(u,v)G_y(u,v)) \end{cases} \quad (2)$$

若 G_x 或 G_y 为0时,其梯度方向角为0;若 $G_x \neq 0$

且 $G_y \neq 0$,梯度方向角 $\theta(i,j) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{v_y(i,j)}{v_x(i,j)}$ 。

步骤2:梯度重心法自适应定位

为了自适应计算,这里取当前轮廓点梯度幅值的1/4作为最低阈值,判断该点是否属于轮廓部分。在给定领域内,沿梯度向量的两个相反方向进行搜索,当梯度幅值小于阈值或达到领域最大宽度时停止搜索。令领域宽度为 W ,在该领域内通过梯度重心法计算亚像素轮廓点 (X_{sub}, Y_{sub}) ,公式如下:

$$\begin{cases} m = \frac{\sum_{n=-W/2}^{W/2} G(X_{maxgray} + \frac{1}{k}n, Y_{maxgray} + n)n}{\sum_{n=-W/2}^{W/2} G(X_{maxgray} + \frac{1}{k}n, Y_{maxgray} + n)} & \theta \in \left[\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2} \right) \cup \left(-\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{4} \right] \\ m = \frac{\sum_{n=-W/2}^{W/2} G(X_{maxgray} + kn, Y_{maxgray} + n)n}{\sum_{n=-W/2}^{W/2} G(X_{maxgray} + kn, Y_{maxgray} + n)} & \theta \in \left(-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4} \right) \\ (X_{sub}, Y_{sub}) = \left(X_{sub} + \frac{m}{k}, Y_{sub} + m \right) & \theta \in \left[\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2} \right) \cup \left(-\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{4} \right] \\ (X_{sub}, Y_{sub}) = (X_{sub} + m, Y_{sub} + mk) & \theta \in \left(-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中 k 为梯度方向的斜率。对标定板上圆点轮廓的提取效果如图 1 所示。可以看出像素级轮廓的坐标都处于像素的中心,线段式的轮廓导致其难以真实描述实际的圆形轮廓;而通过亚像素处理后,可以看出线段式的轮廓经过处理,变得更加光滑,更加符合轮廓实际的曲率(本刊为黑白印刷,疑问之处请向作者咨询)。

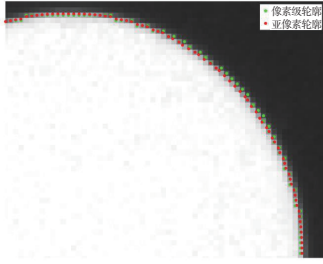


图 1 轮廓点提取对比

1.2 基于闭环约束模型的相机标定优化

张氏标定法模型中,将最小化标定板圆心在相机成像的投影点与实际成像点之间的重投影误差和作为目标优化函数,该目标仅仅优化了单目相机的标定。而轨旁受电弓在线监测系统中所用的为双目相机,因此需要将双目中的闭环约束条件加入。经过双目标定可以得到左、右相机与标定板之间的位姿矩阵 (R_l, t_l, R_r, t_r) ,也能得到左右相机之间的位姿矩阵 (R, t) ,将每一组标定板坐标通过 (R_l, t_l) 可以转换到左相机坐标系下,接着通过 (R, t) 可以转换到右相机坐标系下,最后通过 (R_r, t_r) 的逆矩阵又回到了标定板坐标系下,从而形成闭环。新加入的闭环约束如图 2 所示。

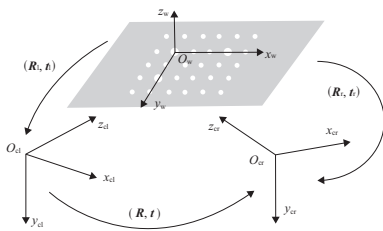


图 2 闭环约束模型

设圆阵列标定板上一点 Q ,其闭环重投影点为 $Q' = [R_r \ t_r]^{-1} [R \ t] [R_l \ t_l] Q$,将最小化标定板圆心与其闭环重投影点误差和作为第 3 个目标优化函数,使用 LM 算法迭代求解优化后的相机内参、外参和畸变参数。左、右相机及其双目之间的目标函数为

$$\begin{cases} F_l(A, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2) = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|\tilde{q}_l^{i,j} - q_l^{i,j}\|^2 \\ F_r(A, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2) = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|\tilde{q}_r^{i,j} - q_r^{i,j}\|^2 \\ F(A, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, R, t) = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|Q^{i,j} - Q'^{i,j}\|^2 \end{cases} \quad (4)$$

相机内参、外参和畸变参数经过上述两个步骤即实现相机的高精度标定。

2 实验与分析

2.1 实验系统

两个 500 万像素的工业相机构成了本文的双目视觉系统。采用如图 3 所示的圆阵列标定板,所示标定板大圆直径为 15 mm,小圆直径为 10 mm,圆心距为 15 mm。将标定板放置双目公共视场中,调节相机的光圈与焦距,使标定板成像清晰后,利用左右相机同时拍摄 15 张标定板图片,部分图像的检测效果如图 4 所示,本文方法标定结果如表 1 所示。

左右相机标定的平均重投影误差分别为 0.030 个像素和 0.032 个像素,双目重投影误差为 0.046 个像素,具有较高的标定精度,符合视觉测量要求。

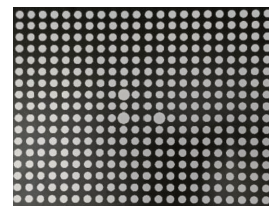


图 3 双目标定使用的标定板

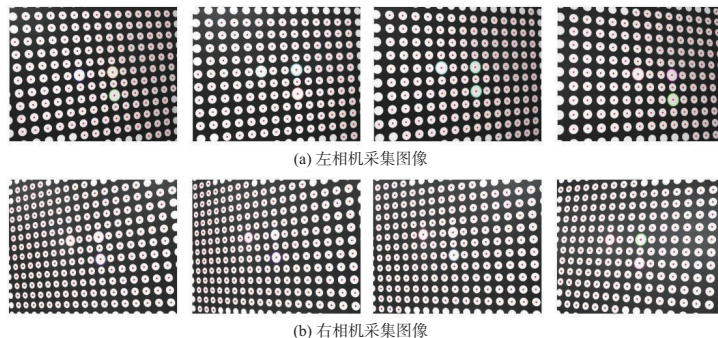


图 4 双目标定部分检测图像

表 1 双目相机参数

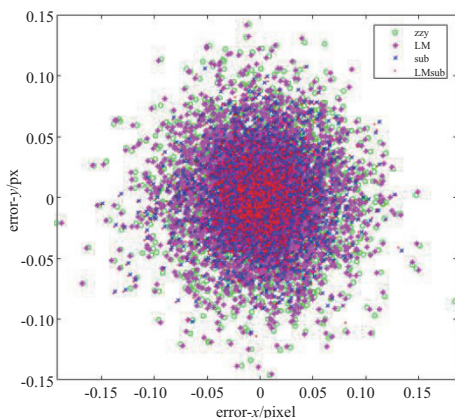
相机	参数							
	f/dX	f/dY	u_0	v_0	k_1	k_2	p_1	p_2
左相机	2 387.69	2 388.53	668.57	474.95	-0.100 6	0.139 1	-0.000 1	-0.000 8
右相机	2 392.95	2 393.73	667.31	495.74	-0.097 2	0.138 3	-0.000 3	0.000 5

双目标定结果

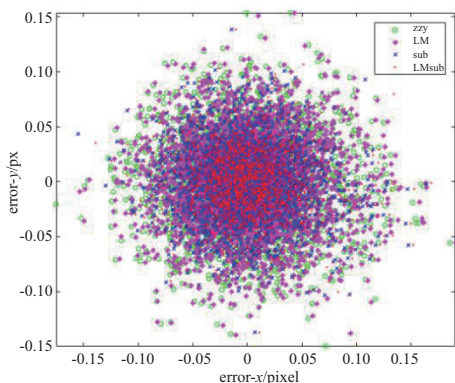
$$R = \begin{bmatrix} 0.814 & 0.018 & 0.580 \\ -0.003 & 0.999 & -0.026 \\ -0.580 & 0.020 & 0.814 \end{bmatrix}, t = \begin{bmatrix} -299.09 \\ 4.30 \\ 102.48 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 标定算法对比实验

为验证本文提出的双目标定方法(亚像素坐标与闭环约束模型)精度,对比使用张氏标定法(zzy 表示)、仅使用亚像素坐标标定法(sub 表示)、仅使用闭环约束模型标定法(LM 表示)和本文亚像素坐标与闭环约束模型标定法($LMsub$ 表示)。分别计算左、右相机获得的原始图像坐标与计算后的重投影坐标之间的 x 方向、 y 方向误差,如图5所示。此外,用不同方法对拍摄多组的标定板图片进行标定,对比其重投影误差大小,不同相机标定方法标定后的左相机重投影误差如图6所示。



(a) 左相机



(b) 右相机

图 5 重投影坐标方向误差散点图

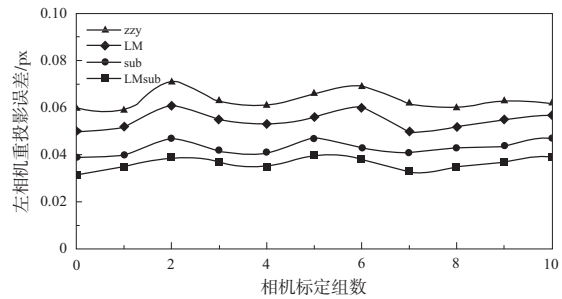


图 6 不同方法下左相机重投影误差

图5通过对比4种标定方法,可明显地看出散点图从外围的 zzy 坐标点向 $LMsub$ 坐标点汇聚收敛,即坐标误差的收敛。

由图6可知4条重投影误差线条中, sub 相较于 zzy ,可看出亚像素轮廓提取对相机标定精度提升较大,同时也印证了二维坐标的提取精度在一定意义上决定了相机标定的精度; LM 相较于 zzy ,可看出在 zzy 的基础上进行非线性优化对标定精度有一定的提升; $LMsub$ 结合了 LM 与 sub 两者的优势,其重投影误差最小且相较于 zzy 重投影误差降低了一半,因此可知本文方法双目标定出的参数具有较高精度。

利用双目立体视觉对圆阵列标定板进行三维重建,重建的圆心坐标拟合的平面标准偏差为0.012 mm,如图7所示。本文使用的圆阵列标定板为高精度加工平面,因此通过本文的标定方法成功实现对相机参数的标定。

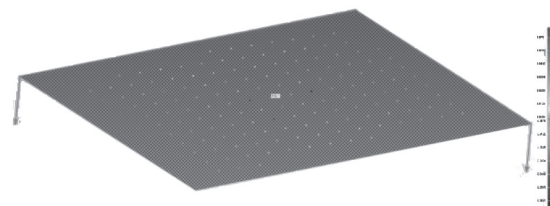


图 7 标定板双目重建结果

3 结语

本文提出了一种高精度标定方法。在传统张氏标定法的基础上,采用BAZEN方法提取标定板

圆点的亚像素轮廓,并建立闭环约束模型来优化相机标定内外参数。相机标定精度在一定程度上决定了其测量精度,因此高精度的标定对视觉测量来说尤为重要。本文方法通过两个方面来提升标定精度,一方面是通过提升圆点轮廓的提取精度,从而提升了张氏标定法的输入参数——圆心的提取精度;另一方面,通过建立闭环约束模型,解决了将最小化标定板圆心重投影点误差可能陷入局部最优的问题。

参考文献:

- [1] 谭禹.地铁车辆系统安全风险评估研究[D]. 大连:大连交通大学,2023.
- [2] 李佳豪.列车受电弓滑板的载流摩擦磨损机理及其涂层保护研究[D]. 长沙:中南大学,2023.
- [3] 王同丽.基于机器视觉的高铁受电弓异常状态检测系统研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2023.
- [4] 张新龙.基于单目视觉激光扫描成像的受电弓磨损检测系统设计[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2019.
- [5] 那一鸣,胡超,邱业余,等.基于机器视觉的汽车车门三维定位引导[J]. 中国机械工程,2024,35(9):1677-1687.
- [6] 赵守君,于洋,秦羽舟,等.基于深度学习的机器视觉技术在造船中的应用[J]. 船舶工程,2021,43(6):12-15.
- [7] 雷冬,杜文康,朱国靖,等.基于机器视觉方法的高铁桥梁监测技术研究[J]. 铁道工程学报,2023,40(3):45-49.
- [8] 刘昊瞳,崔海华,李鹏程,等.航空航天装配基准孔鲁棒性精确检测方法[J]. 光学学报,2023,43(3):76-85.
- [9] 张广军.视觉测量[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [10] 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):242-249.
- [11] 黄及远,李敏,谢兵兵,等.双目视觉关键技术研究综述[J]. 制造业自动化,2023,45(5):166-171.
- [12] 黄文文,彭小红,李丽圆,等.相机标定方法及进展研究综述[J]. 激光与光电子学进展,2023,60(16):9-19.
- [13] TSAI R. 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 and Automation,1987,3(4):323-344.
- [14] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2000,22(11):1330-1334.
- [15] BU L B, HUO H T, LIU X Y, et al. Concentric circle grids for camera calibration with considering lens distortion[J]. Optics and Lasers in Engineering,2021,140:106527.
- [16] 黄智超,李洸杲,李根,等.一种视觉靶标标定与位姿解算方法[J]. 机械制造与自动化,2023,52(4):206-208.
- [17] CHEN X C, SONG X K, WU J, et al. Camera calibration with global LBP-coded phase-shifting wedge grating arrays[J]. Optics and Lasers in Engineering,2021,136:106314.
- [18] 李中伟,王从军,史玉升.3D测量系统中的高精度摄像机标定算法[J]. 光电工程,2008,35(4):58-63.
- [19] 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):151-159.
- [20] BAZEN A M, GEREZ S H. Systematic methods for the computation of the directional fields and singular points of fingerprints [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2002,24(7):905-919.
- [21] MARQUARDT D W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters[J]. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics,1963,11(2):431-441.

收稿日期:2024-11-13