

“煤矿机电设备智能监控技术与应用”专题

【编者按】目前,智能开采已是煤矿生产模式变革的共识,其以少人/无人开采为目标,以设备安全可靠运行
为前提,催生了一系列设备状态监测、诊断与控制的新技术。为进一步总结、凝练我国煤矿机电设备智能监
控技术与应用的最新进展,《工矿自动化》特邀西安科技大学张旭辉教授担任客座主编,樊红卫副教授、毛清
华副教授、周李兵高级工程师担任客座副主编,于2021年第7期策划出版“煤矿机电设备智能监控技术与应
用”专题。在专题刊出之际,衷心感谢各位专家学者的大力支持!

文章编号:1671-251X(2021)07-0001-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2021010057

悬臂式掘进机截割头位姿视觉测量系统改进

张旭辉^{1,2}, 谢楠¹, 张超¹, 杨文娟¹, 张楷鑫¹, 周创¹

(1. 西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 陕西省矿山机电装备智能监测重点实验室, 陕西 西安 710054)



扫码移动阅读

摘要:基于红外LED特征的悬臂式掘进机截割头位姿视觉测量系统中,外参标定稳定性和红外LED光
斑中心提取精确性对截割头位姿检测精度具有重要影响。现有外参标定方法需依靠经验将截割臂摆至正中
位置(未知),标定结果存在较大波动。针对该问题,提出了一种基于多点固定的外参标定方法,该方法控制
掘进机截割臂分别摆动到左上角、右上角、左下角、右下角4个已知极限位置并采集标靶图像,计算外参矩阵
值,可有效提高外参标定稳定性。现有的灰度质心法采用像素的灰度值作为权重来计算光斑质心,精度只能
到像素级,仅粗略满足实际应用需求。针对该问题,提出采用亚像素级边缘检测算法改进光斑中心提取方
法:首先采用灰度质心法进行光斑中心粗提取,然后采用亚像素级边缘检测算法求出亚像素级边缘坐标,最
后使用最小二乘法拟合光斑中心,实现光斑中心精确提取。实验结果表明:改进光斑中心提取方法将标靶
LED灯间距最大测量误差从3.2 mm缩小为1 mm,提高了检测精度;基于多点固定的外参标定方法所获得
的外参数矩阵比较稳定,平移矩阵中位移的最大变化幅度为15 mm,旋转矩阵中角度的最大变化幅度为1°;
视觉测量系统改进前对截割头摆角的测量误差范围为 $[-1.2^{\circ}, 1.7^{\circ}]$,改进后截割头水平摆角误差范围为
 $[-0.5^{\circ}, 0.5^{\circ}]$,垂直摆角误差范围为 $[-0.6^{\circ}, 0.6^{\circ}]$,说明改进方法有效提高了截割头摆角的检测精度。

关键词:悬臂式掘进机;截割头位姿检测;防爆工业相机;视觉测量;外参标定;光斑中心提取
中图分类号:TD632 文献标志码:A

Improvement of vision measurement system for cutting head position of boom-type roadheader

ZHANG Xuhui^{1,2}, XIE Nan¹, ZHANG Chao¹, YANG Wenjuan¹,
ZHANG Kaixin¹, ZHOU Chuang¹

(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Monitoring,
Xi'an 710054, China)

Abstract: In the vision measurement system for cutting head position of cantilever roadheader based on

收稿日期:2021-01-20;修回日期:2021-07-05;责任编辑:胡娴。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974228, 51834006);陕西省创新能力支撑计划项目(2018TD-032);陕西省重点研发计划项目
(2018ZDCXL-GY-06-04)。

作者简介:张旭辉(1972—),男,陕西凤翔人,教授,博士研究生导师,研究方向为煤矿机电设备智能检测与控制,E-mail:zhangxh@xust.edu.
cn. 通信作者:谢楠(1997—),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为智能掘进技术,E-mail:870995904@qq.com。

引用格式:张旭辉,谢楠,张超,等.悬臂式掘进机截割头位姿视觉测量系统改进[J].工矿自动化,2021,47(7):1-7.

ZHANG Xuhui, XIE Nan, ZHANG Chao, et al. Improvement of vision measurement system for cutting head position of boom-type
roadheader[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(7): 1-7.

infrared LED characteristics, the stability of external calibration and the accuracy of infrared LED spot center extraction have an important influence on the cutting head position detection accuracy. The existing external parameter calibration method relies on experience to swing the cutting arm to the center position (unknown), and the calibration results have large fluctuations. In order to solve the above problem, a multi-point fixed external parameter calibration method is proposed. This method controls the cutting arm of the roadheader to swing to the four known limit positions of upper left corner, upper right corner, lower left corner and lower right corner respectively, and collects the target images. The method calculates the value of the external parameter matrix, which can improve the stability of the external parameter calibration effectively. The existing gray-scale centroid method uses the grayscale value of the pixel as the weight to calculate the spot centroid. And the accuracy can only reach the pixel level, which only roughly meets the practical application requirements. In order to solve this problem, a sub-pixel edge detection algorithm is proposed to improve the spot center extraction method. Firstly, the gray-scale centroid method is used for coarse extraction of the spot center. Secondly, the sub-pixel level edge detection algorithm is used to find the sub-pixel level edge coordinates. Finally, the least squares method is used to fit the spot center to achieve accurate extraction of the spot center. The experimental results show that the improved spot center extraction method reduces the maximum measurement error of the target LED lamp spacing from 3.2 mm to 1 mm, which improves the detection accuracy. The external parameter matrix obtained by the multi-point fixed external parameter calibration method is relatively stable, the maximum variation of displacement in the translation matrix is 15 mm, and the maximum variation of angle in the rotation matrix is 1° . Before the improvement of the vision measurement system, the measurement error of the cutting head swing angle was within $[-1.2^\circ, 1.7^\circ]$. After the improvement, the error of the horizontal swing angle of the cutting head is within $[-0.5^\circ, 0.5^\circ]$ and the error of the vertical swing angle is within $[-0.6^\circ, 0.6^\circ]$. The results show that the improved method improves the detection accuracy of the cutting head swing angle effectively.

Key words: cantilever roadheader; cutting head position detection; explosion-proof industrial camera; vision measurement; external parameter calibration; spot center extraction

0 引言

近年来,随着煤矿综采技术装备快速发展,开采任务量成倍增长,采掘失衡问题尤为突出^[1-2],掘进装备智能化问题亟待解决。由于井下环境复杂,存在粉尘、噪声等,在截割过程中掘进机司机难以准确判断截割头位置,导致巷道断面成形质量差等问题^[3-4]。因此,研究掘进机截割头位姿精确测量,实现复杂工况下井下设备的局部定位,对于提高巷道断面成形质量和掘进工作效率具有重要意义。

悬臂式掘进机截割头位姿检测方法主要包括接触式和非接触式 2 种,其中接触式测量方式应用广泛,取得了一定效果,但易受井下振动等工况影响,造成传感器数据不稳甚至失效^[5-8]。视觉测量是一种非接触式测量方法,利用光学成像原理和位姿解算模型实现目标物体的姿态求解,具有价格低、便于安装标定的特点,用于设备局部定位具有较大优势^[9-10]。文献[11]提出了一种基于红外 LED 特征的悬臂式掘进机截割头位姿视觉测量方法,通过相

机采集红外标靶特征,实现了截割头姿态的实时解算和可视化显示。但在实际应用过程中,巷道环境、测量方法、标定参数误差、图像特征提取精度等都会对视觉测量结果产生影响^[12]。

工业相机外参标定稳定性对视觉测量精度具有重要影响。在悬臂式掘进机截割头位姿视觉测量系统中,外参标定即求取相机与掘进机机体之间的位姿关系,确定相机坐标系与掘进机基坐标系的相对位置,从而为截割头位姿解算奠定基础。外参数即相机坐标系相对于掘进机基坐标系的转换矩阵。现有外参标定方法需依靠经验将截割臂摆至正中位置(未知),标定结果存在较大波动。针对该问题,本文提出了一种基于多点固定的外参标定方法,该方法将截割臂摆动到已知极限位置时的相关数据作为标定依据,可有效提高外参标定稳定性,且具有简单、快速、不受限于机身位姿的优点。

防爆工业相机采集掘进机运行过程中的红外 LED 标靶图像并进行预处理后,需进一步提取光斑中心来进行截割头位姿解算。但红外 LED 光斑的

形状不规则,难以对光斑中心进行提取,且掘进机作业过程中的振动、光线等因素会影响光斑中心提取精度。现有的灰度质心法采用像素的灰度值作为权重来计算光斑质心,精度只能到像素级,仅可粗略满足实际应用需求。亚像素级边缘检测算法可有效降低光斑中心提取误差,从而提高视觉测量精度。因此,本文采用亚像素级^[13]边缘检测算法对光斑中心提取方法进行改进。

1 系统组成及原理

悬臂式掘进机截割头位姿视觉测量系统由悬臂式掘进机、防爆工业相机、红外 LED 标靶、机载防爆计算机、捷联惯导、超声波传感器等组成,如图 1 所示。红外 LED 标靶垂直固定于掘进机截割臂上,防爆工业相机、机载防爆计算机固定于掘进机机身上。

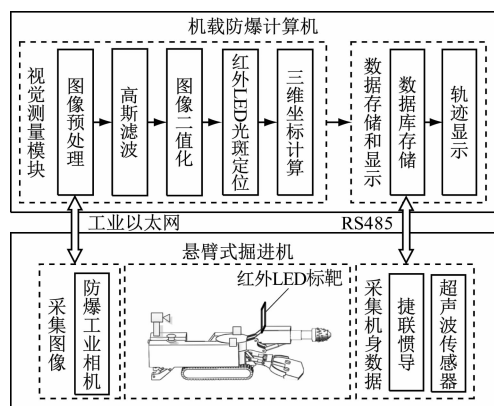


图1 悬臂式掘进机截割头位姿视觉测量系统组成

Fig.1 Composition of vision measurement system for cutting head position of cantilever roadheader

对掘进机运行过程中的红外 LED 标靶图像进行采集和预处理后,求得光斑中心特征点在标靶坐标系和相机坐标系中的坐标,计算截割头的水平摆角和垂直摆角,从而得到截割头相对于机身的位姿 0T ^[14];通过捷联惯导、超声波传感器数据计算得到机身相对于巷道的位姿 0T ;计算截割头相对于巷道断面的位姿,即截割头的绝对位姿 4T :

$${}^4T = {}^0T {}^0_4T \quad (1)$$

2 外参标定改进方法

2.1 坐标系建立

坐标系定义如图 2 所示^[15],其中 $O_0 X_0 Y_0 Z_0$, $O_1 X_1 Y_1 Z_1$, $O_2 X_2 Y_2 Z_2$, $O_3 X_3 Y_3 Z_3$, $O_4 X_4 Y_4 Z_4$ 分别为悬臂式掘进机基坐标系、回转关节坐标系、抬升关节坐标系、伸缩关节坐标系及截割头坐标系, $O_c X_c Y_c Z_c$, $O_w X_w Y_w Z_w$ 分别为相机坐标系及标靶坐标系。

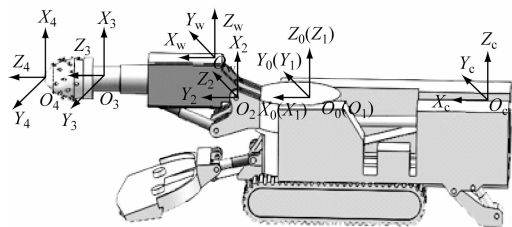


图2 坐标系定义

Fig.2 Definition of coordinate systems

相机坐标系到掘进机基坐标系的转换矩阵 0_cT 为

$${}^0_cT = {}^0_4T {}^4_wT {}^w_cT \quad (2)$$

式中: 0_4T 为掘进机截割头坐标系到掘进机基坐标系的转换矩阵; 4_wT 为标靶坐标系到截割头坐标系的转换矩阵,可根据标靶在悬臂式掘进机上的相对安装位置确定; w_cT 为相机坐标系到标靶坐标系的转换矩阵,可由相机内外参标定方法求得。

2.2 基于多点固定的标定方法

要得到确定相机坐标系到掘进机基坐标系的转换矩阵,需借助视觉测量系统确定 0_4T 的值。

由掘进机结构参数可知,截割臂水平摆角 θ_1 的变化范围为 $[-32^\circ, 32^\circ]$,垂直摆角 θ_2 的变化范围为 $[-132^\circ, -66^\circ]$ 。运行视觉测量系统,控制掘进机截割臂分别摆动到左上角、右上角、左下角、右下角 4 个已知极限位置, (θ_1, θ_2) 分别为 $(-32^\circ, -132^\circ)$, $(32^\circ, -132^\circ)$, $(-32^\circ, -66^\circ)$, $(32^\circ, -66^\circ)$,如图 3 所示。

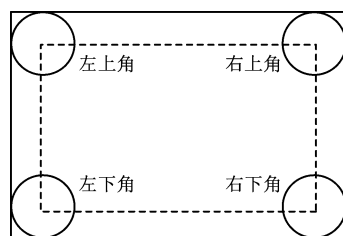


图3 截割头摆动位置

Fig.3 Swing positions of cutting head

依据 (θ_1, θ_2) 的值,结合式(2),采用文献^[15]中的方法求得掘进机截割头坐标系到掘进机基坐标系的转换矩阵 0_4T ,再通过式(2)计算即可得到 0_cT 。为保证精确性,在每个已知极限位置采集多组标靶图像,分别计算得到多组外参矩阵值;采用箱线图法^[16]选取适当阈值,剔除标定过程中所出现的异常值;取平均值,求得相机坐标系到掘进机基坐标系的转换矩阵 0_cT 。 0_cT 由旋转矩阵 R 和平移矩阵 t 组成:

$${}^0_cT = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

求得相机坐标系到掘进机基坐标系的转换矩阵 0_cT ,即完成外参标定过程。结合 w_cT , 4_wT ,再次代入式(2),可求解运动过程中截割头相对于机身的转换

矩阵 0_4T 。将 0_4T 代入式(1),可得到截割头的绝对位姿 4T ,从而实现截割头局部位姿测量。

3 光斑中心提取改进方法

为实现光斑中心精确定位,首先采用灰度质心法进行光斑中心粗提取,然后采用亚像素级边缘检测算法求出亚像素级边缘坐标^[17],最后使用基于最小二乘法的椭圆中心拟合算法^[18]进行光斑中心定位。

进行亚像素级边缘细定位之前,将边缘点所在区域划分为 2 个部分,如图 4 所示,设黄色部分为区域 1,蓝色部分为区域 2,原点 O 为圆心, $P(x_p, y_p)$ 为圆边缘像素点。

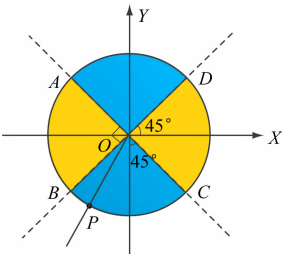


图 4 边缘点区域划分

Fig. 4 Region division for edge point

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{(x_m^2 - x_p^2) \ln f(x_k, y_k) + (x_k^2 - x_m^2) \ln f(x_k, y_k) + (x_p^2 - x_k^2) \ln f(x_k, y_k)}{(x_m - x_p) \ln f(x_k, y_k) + (x_k - x_m) \ln f(x_k, y_k) + (x_p - x_k) \ln f(x_m, y_m)} \\ y_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{(y_n^2 - y_p^2) \ln f(x_j, y_j) + (y_j^2 - y_n^2) \ln f(x_p, y_p) + (y_p^2 - y_j^2) \ln f(x_n, y_n)}{(y_n - y_p) \ln f(x_j, y_j) + (y_j - y_n) \ln f(x_p, y_p) + (y_p - y_j) \ln f(x_n, y_n)} \end{cases} \quad (6)$$

4 实验验证

悬臂式掘进机截割头位姿视觉测量实验平台如图 5 所示,包括 1:5 实验室掘进机模型、30 cm × 30 cm 红外 LED 标靶、MV-EM130M/C 型工业相机、机载防爆计算机、SCA120T 型倾角传感器、拉绳传感器。红外 LED 标靶上均匀分布 16 个红外 LED 光源。倾角传感器、拉绳传感器分别用于检测截割臂垂直摆角和水平摆角。



图 5 悬臂式掘进机截割头位姿视觉测量实验平台

Fig. 5 Experimental platform for vision measurement of cutting head position of cantilever roadheader

4.1 光斑中心提取精度对比

采集到红外 LED 光斑图像后,首先进行二值化处理;其次采用灰度质心法实现光斑中心粗提取,对

设区域 1 中点 P 的临近点为 $K(x_k, y_k), J(x_j, y_j)$, K 点和 J 点分别为直线 OP 与直线 $x = x_p + 1, x = x_p - 1$ 的交点;设区域 2 中点 P 的临近点为 $M(x_m, y_m), N(x_n, y_n)$, M 点和 N 点分别为直线 OP 与直线 $y = y_p + 1, y = y_p - 1$ 的交点。假设边缘点 P 位于区域 2 内,则有 $y_m = y_p + 1$, 因为点 M 在直线 OP 上,且直线 OP 已知,通过 y_m 可以求得 x_m 。

任意像素点 (i, j) 的灰度值可表示为

$$f(i, j) = \int_{i-0.5}^{i+0.5} \int_{j-0.5}^{j+0.5} g(x, y) dx dy \quad (4)$$

式中 $g(x, y)$ 为图像连续光强分布。

对边缘点 P 的临近点进行灰度插值。根据线性插值原理得到 M 点的灰度值:

$$f(x_m, y_m) = (1 - \lambda) f([x_m], y_m) + \lambda f([x_m] + 1, y_m) \quad (5)$$

式中: $[x_m]$ 为 x_m 的整数部分; $\lambda = x_m - [x_m]$ 。

同理可得临近点 $K(x_k, y_k), J(x_j, y_j), N(x_n, y_n)$ 的灰度值 $f(x_k, y_k), f(x_j, y_j), f(x_n, y_n)$ 。根据 4 个临近点的灰度值得到亚像素级边缘点坐标 (x_0, y_0) :

杂点进行滤除;然后采用亚像素级边缘检测方法实现边缘细定位;最后通过最小二乘拟合获取光斑中心,得到其三维坐标值。光斑中心提取过程如图 6 所示。

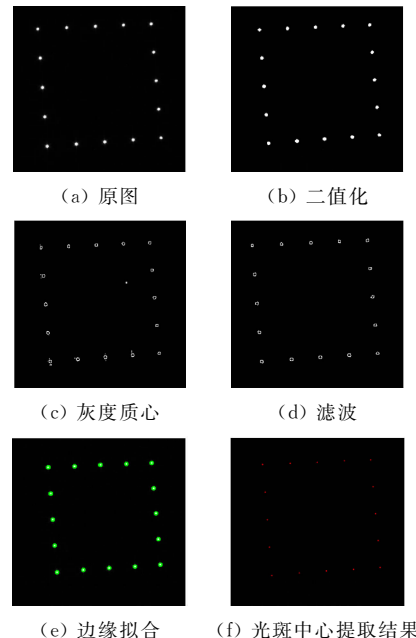


图 6 光斑中心提取过程

Fig. 6 Spot center extraction process

根据所得光斑中心坐标值计算标靶 LED 灯间距,并与实际间距 120 mm 进行对比。将截割头摆动至按 3×3 布置的 9 个位置点,在每个位置点采集多组图像,进行均值滤波处理,测量误差如图 7 所示。

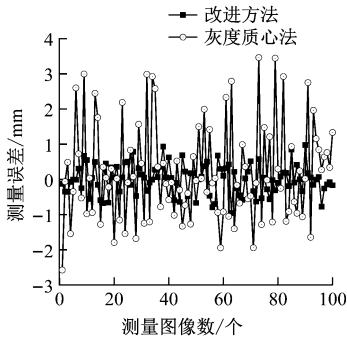


图 7 光斑中心提取方法改进前后测量结果对比
Fig. 7 Comparison of measurement results before and after the improvement of spot center extraction method

由图 7 可知,改进前最大测量误差为 3.2 mm,最大相对误差为 2.7%;改进后最大测量误差为 1 mm,最大相对误差为 0.8%。

4.2 外参标定实验

在实验室关灯并紧闭窗帘,模拟煤矿井下光线不足环境,利用计算机程序实现工业相机的软触发,设置采集时间间隔为 100 ms。分别摆动掘进机截割臂至左上角、左下角、右上角、右下角 4 个极限位置,通过防爆工业相机采集各位置的图像,通过计算机进行图像预处理、光斑中心提取及外参标定。每标定 1 次将相机在 x 轴方向移动 50 mm,实现不同距离的外参标定。改进后的外参标定结果见表 1、表 2。

表 3 截割头水平摆角测量结果对比

Table 3 Measurement results comparison of horizontal swing angle of cutting head

(°)

编号	真实值	测量结果		误差	
		改进前	改进后	改进前	改进后
1	0.013	1.259 183	0.061 166	1.246 183	0.048 166
2	0.029	1.675 658	0.260 241	1.646 658	0.231 241
3	−13.819	−12.372 800	−13.365 700	1.446 200	0.453 300
4	−13.596	−12.400 300	−13.134 300	1.195 700	0.461 700
5	−13.024	−11.441 500	−13.308 680	1.582 500	−0.284 680
6	0.239	0.282 492	−0.115 684	0.043 492	−0.354 684
7	13.923	12.861 410	14.172 280	−1.061 590	0.249 280
8	13.408	13.460 980	13.720 850	0.052 980	0.312 850
9	13.590	13.398 460	13.234 900	−0.191 540	−0.355 100

由表 3、表 4 可知,视觉测量系统改进前对截割头摆角的测量误差范围为[−1.2°,1.7°],改进后截割头水平摆角误差范围为[−0.5°,0.5°],垂直摆角误差范围为[−0.6°,0.6°]。实验结果表明,改进方

表 1 外参数 t

Table 1 External parameter t

m

序号	坐标 x	坐标 y	坐标 z
1	1.528 280	−0.012 039	1.565 070
2	1.576 580	−0.014 584	1.562 610
3	1.626 610	−0.013 408	1.558 500
4	1.671 690	−0.012 921	1.568 660
5	1.726 110	−0.019 743	1.573 890

表 2 外参数 R

Table 2 External parameter R

(°)

序号	x 轴转角 α	y 轴转角 β	z 轴转角 γ
1	−1.909 40	−0.098 079	0.098 080
2	−2.785 72	−0.102 081	0.102 081
3	−2.016 30	−0.166 620	0.166 621
4	−2.157 04	−0.193 729	0.193 730
5	−1.721 15	0.143 189	−0.143 190

由表 1、表 2 可知,平移矩阵中位移的最大变化幅度为 15 mm,旋转矩阵中角度的最大变化幅度为 1°,说明用基于多点固定的外参标定方法所获得的外参数矩阵比较稳定,可为掘进机截割头位姿解算奠定基础。

4.3 系统测量误差对比

在截割头位姿视觉测量实验平台上,使用倾角传感器和拉绳传感器检测截割臂真实摆动角,并采用改进前后的视觉测量系统进行对比实验。截割头水平摆角、垂直摆角测量结果对比分别见表 3、表 4。

法有效提高了截割头摆角的检测精度。以 EBZ160 掘进机为例,截割臂长度为 4.7 m,结合摆角误差范围,可计算得到截割头位置误差在 50 mm 以内,满足煤矿井下截割头实时测量精度需求。

表 4 截割头垂直摆角测量结果对比

Table 4 Measurement results comparison of vertical swing angle of cutting head

(°)

编号	真实值	测量结果		误差	
		改进前	改进后	改进前	改进后
1	−90.257	−89.999 8	−90.532 2	0.257 2	−0.275 2
2	−103.813	−104.219 0	−104.367 0	−0.406 0	−0.554 0
3	−103.452	−104.624 0	−103.101 0	−1.172 0	0.351 0
4	−88.882	−90.001 4	−88.363 2	−1.119 4	0.518 8
5	−72.995	−73.940 7	−72.541 1	−0.945 7	0.453 9
6	−73.181	−73.582 5	−73.591 5	−0.401 5	−0.410 5
7	−73.284	−73.451 5	−74.020 4	−0.167 5	−0.236 3
8	−89.575	−89.445 4	−89.435 0	0.129 6	0.140 0
9	−103.993	−104.114 0	−103.536 0	−0.121 0	0.457 0

5 结论

(1) 针对悬臂式掘进机截割头位姿视觉测量系统外参标定结果存在较大波动的问题,提出一种基于多点固定的外参标定方法,该方法将截割臂摆动到极限位置(已知)时的相关数据作为标定依据,可有效提高外参标定稳定性。

(2) 针对灰度质心法提取光斑中心精度只能到像素级的问题,提出采用亚像素级边缘检测算法改进光斑中心提取方法。在采用灰度质心法进行光斑中心粗提取的基础上,采用亚像素级边缘检测算法进行边缘细定位,再使用基于最小二乘法的椭圆中心拟合算法进行光斑中心定位。

(3) 光斑中心提取精度对比实验结果表明,改进光斑中心提取方法将标靶 LED 灯间距最大测量误差从 3.2 mm 缩小为 1 mm,提高了检测精度。外参标定实验结果表明,基于多点固定的外参标定方法所获得的外参数矩阵比较稳定,平移矩阵中位移的最大变化幅度为 15 mm,旋转矩阵中角度的最大变化幅度为 1°。系统测量误差对比实验结果表明,视觉测量系统改进前对截割头摆角的测量误差范围为 $[-1.2^{\circ},1.7^{\circ}]$,改进后截割头水平摆角误差范围为 $[-0.5^{\circ},0.5^{\circ}]$,垂直摆角误差范围为 $[-0.6^{\circ},0.6^{\circ}]$,说明改进方法有效提高了截割头摆角的检测精度。

参考文献(References):

[1] 王焱金,张建广,马昭.综掘装备技术研究现状及发展趋势[J].煤炭科学技术,2015,43(11):87-90.
WANG Yanjin, ZHANG Jianguang, MA Zhao. Research status and development tendency of mine fully-mechanized heading equipment technology[J].

Coal Science and Technology,2015,43(11):87-90.

[2] 王步康.煤矿巷道掘进技术与装备的现状与趋势分析[J].煤炭科学技术,2020,48(11):1-11.
WANG Bukang. Current status and trend analysis of roadway driving technology and equipment in coal mine[J]. Coal Science and Technology,2020,48(11):1-11.

[3] 项杰,杨尚武.悬臂式掘进机导航技术现状及其发展[J].科技创新与应用,2019(14):160-161.
XIANG Jie, YANG Shangwu. Present situation and development of navigation technology of boom-type roadheader [J]. Technology Innovation and Application,2019(14):160-161.

[4] 田原.悬臂式掘进机导航技术现状及其发展方向[J].工矿自动化,2017,43(8):37-43.
TIAN Yuan. Present situation and development direction of navigation technology of boom-type roadheader[J]. Industry and Mine Automation,2017,43(8):37-43.

[5] 李军利.悬臂式掘进机断面自动成形理论与控制策略研究[D].太原:太原理工大学,2009.
LI Junli. Research on automatic cross section profiling theory and control strategy for boom-type roadheader [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2009.

[6] 王苏戎,吴森.基于 PCC 的纵轴式掘进机自主截割控制系统研究[J].煤炭工程,2016,48(6):132-135.
WANG Suyu, WU Miao. Autonomous cutting control system of longitudinal roadheader based on PCC[J]. Coal Engineering,2016,48(6):132-135.

[7] 冯宪琴,苑卫东,黄燕梅.矿井掘进机自动截割成形控制技术研究[J].煤炭技术,2014,33(5):194-196.
FENG Xianqin, YUAN Weidong, HUANG Yanmei. Research on mine tunneling machine automatic cutting shaping control technology [J]. Coal

- Technology, 2014, 33(5):194-196.
- [8] 贺建伟,常映辉,陈宁,等.井下掘进装备组合导航系统研究[J].煤矿机械,2020,41(9):32-34.
HE Jianwei, CHANG Yinghui, CHEN Ning, et al. Research on integrated navigation system of underground driving equipment [J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41(9):32-34.
- [9] 杜雨馨,刘停,童敏明,等.基于机器视觉的悬臂式掘进机机身位姿检测系统[J].煤炭学报,2016,41(11):2897-2906.
DU Yuxin, LIU Ting, TONG Minming, et al. Pose measurement system of boom-type roadheader based on machine vision[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11):2897-2906.
- [10] 张旭辉,刘永伟,毛清华,等.煤矿悬臂式掘进机智能控制技术研究及进展[J].重型机械,2018(2):22-27.
ZHANG Xuhui, LIU Yongwei, MAO Qinghua, et al. Research and progress on intelligent control technology of boom-type roadheader in coal mine[J]. Heavy Machinery, 2018(2):22-27.
- [11] 杨文娟,张旭辉,马宏伟,等.悬臂式掘进机机身及截割头位姿视觉测量系统研究[J].煤炭科学技术,2019,47(6):50-57.
YANG Wenjuan, ZHANG Xuhui, MA Hongwei, et al. Research on position and posture measurement system of body and cutting head for boom-type roadheader based on machine vision[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(6):50-57.
- [12] 张旭辉,赵建勋,杨文娟,等.悬臂式掘进机视觉导航与定向掘进控制技术研究[J/OL].煤炭学报:1-11 [2020-09-22]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.20.0357>.
ZHANG Xuhui, ZHAO Jianxun, YANG Wenjuan, et al. Vision-based navigation and directional heading control technologies of boom-type roadheader [J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-11 [2020-09-22]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.20.0357>.
- [13] 罗振威,丁跃尧,甘玉坤,等.基于边缘线性拟合的芯片亚像素定位算法[J].软件,2020,41(6):204-207.
LUO Zhenwei, DING Yuejiao, GAN Yukun, et al. Chip sub-pixel localization algorithm based on edge linear fitting[J]. Computer Engineering & Software, 2020, 41(6):204-207.
- [14] 杨文娟,马宏伟,张旭辉.悬臂式掘进机截割头姿态视觉检测系统[J].煤炭学报,2018,43(增刊2):581-590.
YANG Wenjuan, MA Hongwei, ZHANG Xuhui. Attitude measurement system of cutting head for boom-type roadheader based on vision measurement [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S2):581-590.
- [15] 陈利.基于VR的悬臂式掘进机远程操控与仿真系统研究[D].西安:西安科技大学,2017.
CHEN Li. Research on remote control and simulation system of boom roadheader based on VR[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.
- [16] 寇元宝,汪崇建,负瑞光.采煤机运行数据预处理算法研究[J].煤矿机械,2020,41(10):41-43.
KOU Yuanbao, WANG Chongjian, YUN Ruiguang. Research on preprocessing algorithm of shearer operation data [J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41(10):41-43.
- [17] 王毅恒.多视角三维重建中高精度标定方法的研究与应用[D].北京:北京交通大学,2018.
WANG Yiheng. Research and application of high accuracy calibration method in multi-view 3D reconstruction [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [18] 闫蓓,王斌,李媛.基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法[J].北京航空航天大学学报,2008,34(3):295-298.
YAN Bei, WANG Bin, LI Yuan. Optimal ellipse fitting method based on least-square principle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(3):295-298.