

文章编号: 1671-251X(2024)05-0075-09

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2024030028

# 基于机器视觉的带式输送机高精度煤流检测研究

季现亮<sup>1</sup>, 张文杰<sup>2</sup>, 王玉强<sup>3</sup>, 刘勇<sup>1</sup>, 田祖织<sup>2</sup>, 付拯<sup>2</sup>

(1. 临沂矿业集团菏泽煤电有限公司 郭屯煤矿, 山东 菏泽 274000;

2. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116;

3. 山东能源集团鲁西矿业有限公司, 山东 菏泽 274000)

**摘要:** 针对现有基于机器视觉的带式输送机煤流检测方法存在的图像细节缺失、在多处断裂或断裂间距较大区域拟合效果较差的问题, 基于直射斜收式激光三角测量原理, 提出了一种基于机器视觉的带式输送机高精度煤流检测系统, 将线激光发射器布置在带式输送机测量位置正上方并垂直照射煤堆, 煤堆随带式输送机匀速运动, 利用相机在斜上方实时拍摄包含激光条纹的煤堆表面图像。对煤流检测系统进行标定, 包括相机内参数标定和激光平面标定, 得到煤堆的高度信息; 对煤流截面激光条纹图像进行处理, 从提取精度、算法实时性等角度对比分析了灰度重心法和区域骨架法, 根据对比结果选用区域骨架法提取激光条纹中心; 针对利用图像膨胀操作进行激光条纹断裂修补拟合效果较差的问题, 提出采用最小二乘法作为激光条纹断裂修补算法, 相较于闭运算, 最小二乘法拟合处理的平滑效果更好, 精度较高; 建立煤流截面积计算模型, 通过计算每一帧上煤堆的横截面积, 即可得出不同带速下的煤流体积。实验结果表明, 当带速分别为 0.25, 0.5, 1 m/s 时, 煤流检测系统误差均较小, 最大误差分别为 2.78%, 3.61% 和 3.89%, 验证了煤流检测系统具有较高的准确性。

**关键词:** 带式输送机; 煤流检测; 机器视觉; 线激光发射; 激光三角测量; 激光条纹中心提取; 激光条纹断裂修补; 区域骨架法; 最小二乘法

中图分类号: TD634

文献标志码: A

## Research on high-precision coal flow detection of belt conveyors based on machine vision

Ji Xianliang<sup>1</sup>, ZHANG Wenjie<sup>2</sup>, WANG Yuqiang<sup>3</sup>, LIU Yong<sup>1</sup>, TIAN Zuzhi<sup>2</sup>, FU Zheng<sup>2</sup>

(1. Guotun Coal Mine, Linyi Mining Group Heze Coal and Electricity Co., Ltd., Heze 274000, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

3. Shandong Energy Group Luxi Mining Co., Ltd., Heze 274000, China)

**Abstract:** In response to the problems of missing image details and poor fitting effect in multiple fractures or areas with large fracture spacing in existing machine vision based coal flow detection methods for belt conveyors, a high-precision coal flow detection system for belt conveyors based on machine vision is proposed. It is based on the principle of direct beam oblique collection laser triangulation. The line laser emitter is arranged directly above the measurement position of the belt conveyor and vertically irradiates the coal pile. The coal pile moves uniformly with the belt conveyor, and a camera at an oblique angle is used to capture real-time images of the surface of the coal pile containing laser stripes. The method calibrates the coal flow detection system, including camera internal parameter calibration and laser plane calibration, to obtain the height information of the coal pile. The processing of laser stripe images on coal flow cross-sections is carried out. The gray center of gravity method

收稿日期: 2024-03-12; 修回日期: 2024-05-26; 责任编辑: 胡娴。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52375069)。

作者简介: 季现亮(1972—), 男, 山东齐河人, 工程师, 研究方向为智能矿山技术, E-mail: 997476358@qq.com。通信作者: 张文杰(1998—), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为智能矿山技术, E-mail: 714849265@qq.com。

引用格式: 季现亮, 张文杰, 王玉强, 等. 基于机器视觉的带式输送机高精度煤流检测研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(5): 75-83.

Ji Xianliang, ZHANG Wenjie, WANG Yuqiang, et al. Research on high-precision coal flow detection of belt conveyors based on machine vision[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(5): 75-83.



扫码移动阅读

and regional skeleton method are compared and analyzed from multiple perspectives such as extraction precision and algorithm real-time performance. Based on the comparison results, the regional skeleton method is selected to extract the center of laser stripes. Aiming at the problem of poor fitting effect of laser stripe fracture repair using image dilation operation, the least squares method is proposed as the laser stripe fracture repair algorithm. Compared with closed operations, the least squares method has better smoothing effect and higher precision in fitting processing. The method establishes a coal flow cross-sectional area calculation model. By calculating the cross-sectional area of the coal pile at each frame, the coal flow volume at different belt speeds can be obtained. The experimental results show that when the belt speeds are 0.25, 0.5, and 1 m/s respectively, the detection system errors are relatively small, with maximum errors of 2.78%, 3.61%, and 3.89%. It verifies that the coal flow detection system has high accuracy.

**Key words:** belt conveyor; coal flow detection; machine vision; linear laser emission; direct beam oblique collection laser triangulation; laser stripe center extraction; laser stripe fracture repair; regional skeleton method; least squares method

## 0 引言

煤矿井下带式输送机功率大、使用时间长,是矿井运输系统主要的能耗设备<sup>[1-4]</sup>。传统带式输送机大多采用“逆煤流启动、顺煤流停止”启停方式,虽然可保障煤炭运输安全,但也导致部分输送带处于空载状态,同时由于无法保证带式输送机物料运量均匀,导致系统或单台带式输送机在负载较轻或无负载状态下长时间全速运转,不仅造成电能浪费,而且也使带式输送机传动系统、转动部件、输送带形成无效磨损,缩短了设备使用寿命<sup>[5]</sup>。

准确的煤流检测是实现带式输送机智能控制的前提<sup>[6]</sup>。机器视觉技术具有非接触测量、精度高、可适应较差环境等优点<sup>[7]</sup>,被应用于带式输送机煤流检测中。文献<sup>[8]</sup>利用图像边缘检测求取煤流宽度,结合知识库模糊计算求取煤流量,但该方法检测精度较低,识别效率不高。文献<sup>[9]</sup>提出了基于深度学习的带式输送机煤流量双目视觉检测方法,利用卷积神经网络预测煤料视差,计算煤堆体积,该方法对静态煤堆体积的测量较精确,但实时性较差,不适合测量动态煤流量。文献<sup>[10]</sup>利用激光测距飞行时间原理,结合测速传感器计算煤流量,该方法受环境影响小,但存在飞行像素噪声与多径误差噪声,无法准确计算物体边缘深度。文献<sup>[11]</sup>提出了基于激光扫描与机器视觉的煤流测量方法,通过相机内外参数标定,结合激光器投射角度进行机器视觉系统标定,利用图像膨胀修复激光光斑断点,进而拟合光斑区域边缘骨架,计算激光光斑条纹中心线的煤流截面积,最后结合速度传感器求取煤流体积。但是利用图像膨胀操作进行激光条纹断裂修补会导致图像细节缺失,在多处断裂或断裂间距较大区域拟合效果

较差。

为进一步提高带式输送机煤流检测效率和精度,提出一种基于机器视觉的带式输送机高精度煤流检测系统。采用相机内外参数标定和激光平面标定,直接得到煤堆的高度信息;采用多算法融合手段进行图像灰度化、图像滤波和图像分割等预处理,从提取精度、算法实时性等角度对比分析了灰度重心法和区域骨架法,探究最符合煤流检测的激光条纹中心提取算法;针对利用图像膨胀操作进行激光条纹断裂修补拟合效果较差的问题,提出利用最小二乘法拟合效果好且可满足算法实时性要求的特点,采用最小二乘法作为激光条纹断裂修补算法;对煤流截面积计算模型进行简化,计算不同带速下的煤流体积。

## 1 煤流检测系统原理与硬件平台搭建

### 1.1 煤流检测系统原理

激光三角测量是一种线结构光测量技术。根据激光三角原理,采用激光光刀对物体表面进行扫描,用工业相机采集物体表面漫反射信号并送入计算机,得到光刀曲线;利用基准面、像点、像距等之间的关系计算物体表面的深度信息,结合测头的位移得到物体表面三维坐标信息<sup>[12]</sup>。在多种激光三角测量布置方式中,直射斜收式结构紧凑,便于安装与调试,适合进行集成化设计,且激光光斑能量分布均匀,具有较高的测量精度和稳定性<sup>[13]</sup>。因此本文基于直射斜收式激光三角测量原理搭建煤流检测系统。

直射斜收式激光三角测量原理如图 1 所示。线激光垂直投射,矿用隔爆相机以一定角度照射,  $C$  点为煤流平面上的投影点,相机光轴交传感器于  $O_1$  点,  $h$  为被测物体实际高度,  $H$  为镜头中心与参考

平面之间的垂直距离,  $OO_1$  为矿用隔爆相机成像中心与镜头之间的距离, 投射激光束  $AC$  与相机镜头光轴  $OA$  之间的夹角为  $\beta$ ,  $O_1C_1$  为矿用隔爆相机成像平面上的光斑移动量。根据三角形相似关系可求得被测物体实际高度:

$$h = \frac{H}{\cos^2 \beta + \frac{O_1O}{O_1C_1} \sin \beta \cos \beta} \quad (1)$$

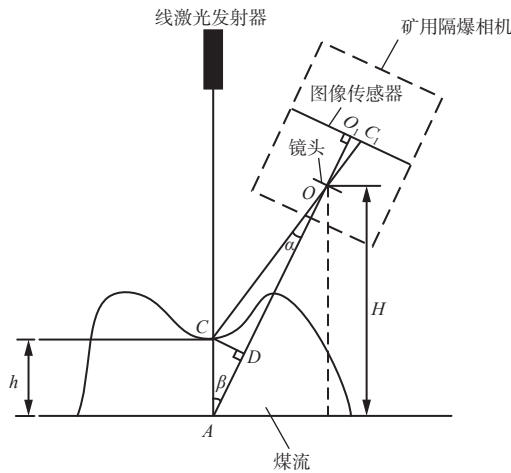


图1 直射斜收式激光三角测量原理

Fig. 1 Principle of direct oblique receiving laser triangulation

将线激光发射器布置在带式输送机测量位置正上方并垂直照射煤堆, 煤堆随带式输送机匀速运动, 利用相机在斜上方实时拍摄包含激光条纹的煤堆表面图像, 将连续图像信息传给计算机。

### 1.2 煤流检测系统硬件平台

实验搭建煤流检测系统时, 在硬件方面需要进行带式输送机、相机和激光器的选型。实验用带式输送机相关参数见表1。

表1 带式输送机相关参数

Table 1 Belt conveyor related parameters

参数	值
额定运量/(t·h <sup>-1</sup> )	15
运输距离/m	2.5
胶带宽度/mm	400
胶带速度/(m·s <sup>-1</sup> )	0~1

煤流检测系统需要对图像进行逐帧处理, 因此对实时性要求较高, 同时为了排除外界干扰因素, 需要减小增益和曝光时间, 使得视野中尽可能只有激光条纹信息。选用 SUA134GC 面阵相机, 其有效像素大小为 130 万, 最大帧速率为 211 帧/s, 镜头可变焦距范围为 7~36 mm; 激光器采用型号为 HO-Y650P100-26110 的主动光源发射器, 其输出波长为 650 nm, 具有方向性好、亮度高、单色性好和寿命长

等优点。使用工业铝型材搭建长方体框架, 用于安装工业相机和线激光发射器, 如图2所示。

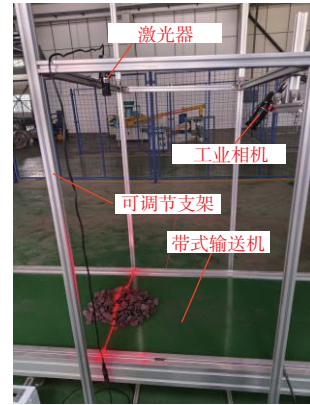


图2 煤流检测系统硬件平台

Fig. 2 Coal flow detection system hardware platform

## 2 煤流检测系统标定

在机器视觉尺寸测量中, 相机标定是图像处理的首要步骤。

### 2.1 相机内参标定及畸变校正

利用 HALCON 助手模块进行相机内参标定, 具体步骤如下。

1) 生成标定文件。调用 gen\_caltab 算子生成标定板描述文件, 包括标定板点的行数和列数、两圆心点间距、点直径与点间距比值。

2) 相机参数初始化。根据厂家信息设置相机初始化参数: 单个像元宽 4.8 μm, 高 4.8 μm, 焦距为 13 mm, 图像高度为 1 024 像素, 宽度为 1 280 像素。

3) 图像采集。打开标定界面, 连接图像采集助手, 放置标定板, 实时采集提取标定板角点信息。移动标定板, 变换位置和角度, 让每个位置都有标定板出现, 并将标定板垫起采集 3~4 张图像, 用于标定相机焦距。如果显示提取角点信息失败, 则删除该图像, 重新采集。标定相机内参时采集的 16 张图像如图3所示。

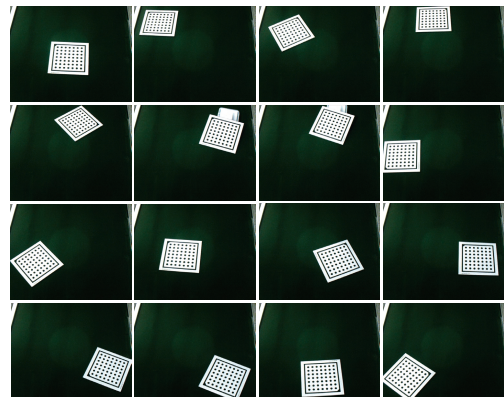


图3 标定相机内参时采集的图像

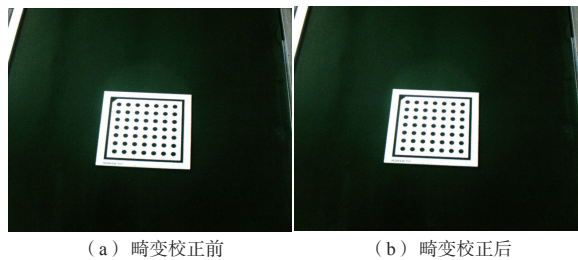
Fig. 3 Images captured during camera calibration

4) 生成相机内参。相机内参信息见表 2。根据标定参数进行图像畸变校正。首先,利用 `change_radial_distortion_cam_par` 算子根据指定径向畸变确定一个新的没有畸变的内参;然后,利用 `gen_radial_distortion_map` 算子对发生径向畸变的图像生成投影映射;最后,调用 `map_image` 算子映射数据进行畸变校正。畸变校正前后对比如图 4 所示。

表 2 相机内参信息

Table 2 Camera internal reference information

参数	值
平均误差	0.046 038
单个像素宽度/ $\mu\text{m}$	4.836 41
单个像素高度/ $\mu\text{m}$	4.8
焦距/mm	15.486 9
畸变参数/ $\text{m}^{-2}$	-658.29
中心点横坐标/像素	598.431
中心点纵坐标/像素	491.725
图像宽度/像素	1 280
图像高度/像素	1 024



(a) 畸变校正前 (b) 畸变校正后

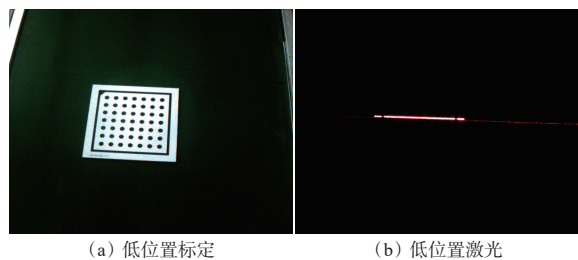
图 4 畸变校正前后对比

Fig. 4 Comparison before and after distortion correction

### 2.2 激光平面标定

通过激光平面标定可确定激光扫描平面的位置和朝向,得到可靠和精确的高度信息。激光平面标定步骤如下。

1) 确定基准面,将标定板放在空载时带式输送机上,利用 HALCON 标定助手提取低位置标定板角点特征(图 5(a)),得到低位置外参,即平移距离和旋转角度。调节曝光时间和增益,得到激光器打到标定板上的激光图像(图 5(b))。

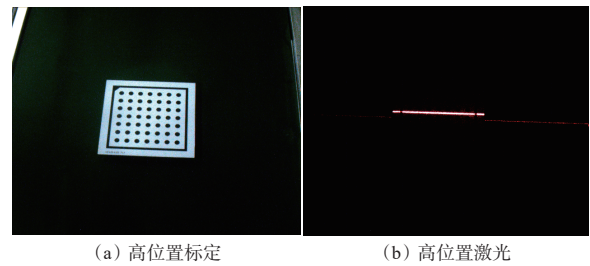


(a) 低位置标定 (b) 低位置激光

图 5 低位置图像

Fig. 5 Low-position images

2) 垫起标定板,重复步骤(1),得到高位置外参和激光图像,如图 6 所示。



(a) 高位置标定 (b) 高位置激光

图 6 高位置图像

Fig. 6 High-position images

3) 利用采集的高低位置相机外参和激光条纹拟合激光平面,得到激光平面方程:

$$F(x,y,z) = 0.001\ 972x + 0.021\ 387y - 0.006\ 914z - 266.159 = 0 \quad (2)$$

式中  $x, y, z$  分别为像素点在煤流宽度方向、带式输送机运行方向、煤流高度方向的坐标。

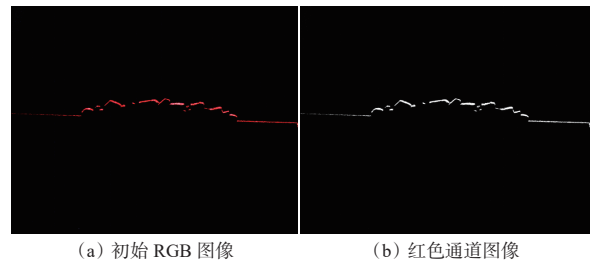
## 3 煤流截面激光条纹处理方法

### 3.1 图像预处理

图像预处理可消除图像中的无关信息,增强有关信息的可检测性,最大限度地简化数据<sup>[14]</sup>。

#### 3.1.1 红色通道分离

采集的彩色图像由 R, G, B 三种颜色亮度变化及其相互之间的叠加得到<sup>[15]</sup>。考虑到相机帧速率和外部环境因素影响,经过调节,获取如图 7(a)所示的激光条纹图像,不仅最大限度地排除了带式输送机、煤流和外部因素的影响,还能保证相机的帧速率。因为使用红色线激光发射器,图像上基本只有黑色和红色,因此,采用红色通道分离方法得到显著的激光图像,如图 7(b)所示。



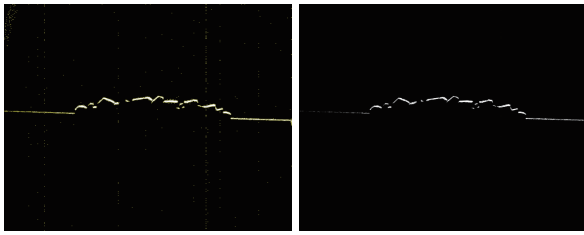
(a) 初始 RGB 图像 (b) 红色通道图像

图 7 红色通道分离前后激光条纹

Fig. 7 Laser stripes before and after red channel separation

#### 3.1.2 图像滤波

由于 CMOS 工业相机自身传感器产生的光电信号噪声,加上外部环境干扰,图像中易产生椒盐噪声和高斯噪声<sup>[16]</sup>,如图 8(a)所示。本文使用中值滤波法进行滤波,结果如图 8(b)所示。中值滤波法保留了图像的细节,运行时间也较短。



(a) 滤波前 (b) 滤波后

图 8 图像滤波前后激光条纹

Fig. 8 Laser stripes before and after image filtering

### 3.1.3 图像分割

图像分割是指将图像分成若干具有相似特性的区域,并提取出感兴趣目标的过程,相似特性可为灰度、纹理和颜色等<sup>[17]</sup>。因为进行了红色通道分离,所以得到的图像只有单像素值,利用阈值法进行图像分割能很好地满足实验要求。阈值分割的原理是选取一个合适的阈值  $T$ ,将  $T$  和图像上所有的像素点进行比较:如果像素值大于或等于  $T$ ,则将灰度值设置为 255,成为被测目标区域;当像素值小于  $T$  时,将灰度值设置为 0。阈值分割结果如图 9 所示。

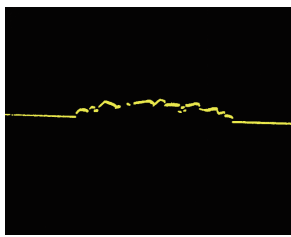


图 9 阈值分割激光条纹

Fig. 9 Threshold segmentation of laser stripe

### 3.2 激光条纹中心提取

线激光光源照射到煤流表面时具有一定宽度,而计算煤堆高度只需要激光条纹的中心坐标信息,因此,需要提取出 1 根像素宽度为 1 的中心线,用其高度代表图像中激光条纹的高度信息<sup>[18-19]</sup>。本文比较了灰度重心法和区域骨架法,并选取最佳算法作为本文的激光条纹中心提取算法。

灰度重心法通过计算图像中每个像素点的灰度值作为权重,确定一个加权形心的位置,从而找到目标物体或线条的灰度重心坐标<sup>[20]</sup>。采用该方法沿着光条横截面方向扫描,筛选出灰度值最大点及灰度值大于极大值与阈值之差的所有像素点。对于这些像素点,将灰度值视为权重,对一行筛选出的点的坐标进行加权平均,将得到的坐标视为光条中心坐标,如图 10 所示。

沿着光条横截面方向搜索,先找到该行中灰度值最大的像素点位置  $M$ ,其灰度值为  $G_{max}$ ,接着从该最大灰度值点处向光条两边搜索,找出高于自适应阈值线  $G_{max}-T$  的所有像素点;设两边界点之间  $n$  个像素

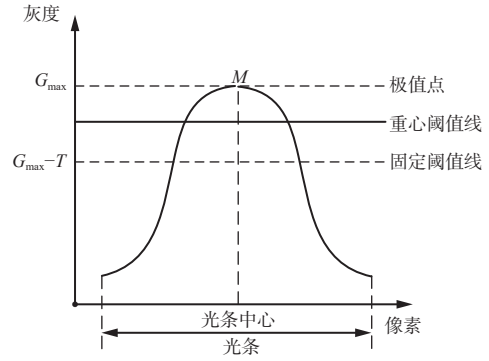


图 10 激光条纹灰度分布

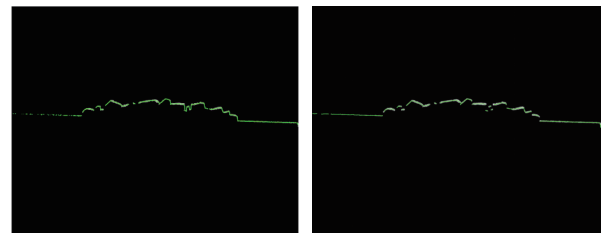
Fig. 10 Laser stripe gray distribution

点中的第  $i$  个像素点列坐标为  $y_i$ ,对应的灰度值为  $g_i$ ,利用灰度重心法得到该像素所在行的光条中心位置的列坐标:

$$y = \frac{\sum_{i=0}^n g_i y_i}{\sum_{i=0}^n g_i} \quad (3)$$

骨架提取也叫二值图像细化,对二值化目标图像进行细化处理后得到目标字符的细线化图像,即线宽为单像素的“骨架”。利用图像骨架提取目标图像的过程不仅是一个重要的拓扑描述,也减少了图像的冗余信息,在信息压缩、特征提取和图像分析等领域均有应用<sup>[21]</sup>。

激光条纹中心线提取结果如图 11 所示。从提取精度、算法时间、方向性、断裂拟合、中心线形状改变大小等方面,将灰度重心法和区域骨架法提取的激光条纹中心线进行对比分析,结果见表 3。



(a) 灰度重心法 (b) 区域骨架法

图 11 激光条纹中心线提取结果

Fig. 11 Laser stripe centerline extraction results

表 3 中心线提取算法对比

Table 3 Comparison of centerline extraction algorithms

算法	提取精度级别	用时/ms	方向性	断裂拟合	中心线形状改变
灰度重心法	亚像素	21.8	差	断裂小处拟合	小
区域骨架法	亚像素	10.8	好	不拟合	小

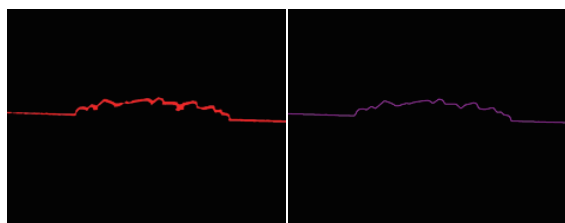
从表 3 可看出,灰度重心法和区域骨架法都是亚像素级别的精度,都能保存激光条纹的细节信息。灰度重心法虽然能在断裂较小的位置拟合,但是其方向性差;区域骨架法虽然不能进行断裂拟合,但是其方向性好,算法用时也比灰度重心法短。综

合考虑,选取区域骨架法作为激光条纹中心提取算法。

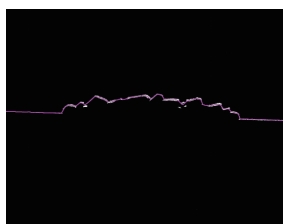
### 3.3 激光条纹断裂修补

#### 3.3.1 形态学处理

形态学处理是对图像的局部像素进行处理,用于提取有意义的局部图像细节<sup>[22]</sup>。通过改变局部区域的像素形态,对目标进行增强,为后续激光条纹提取做准备<sup>[23]</sup>。利用形态学处理的闭运算填补激光条纹断裂部分,结果如图 12(a)所示。利用骨架细化法提取激光条纹中心,结果如图 12(b)所示。将红色通道提取的激光图像和提取出的激光条纹中心线放在一个图中进行比较,结果如图 12(c)所示。可看到,对于大范围的区域,拟合效果较好,但是对于局部小型的区域,由于闭运算丢失了一些图像细节,拟合效果偏差。



(a) 闭运算断裂修补 (b) 骨架细化提取中心条纹



(c) 对比效果

图 12 形态学断裂修补激光曲线

Fig. 12 Morphological fracture repair laser curve

#### 3.3.2 最小二乘法拟合处理

最小二乘法可用某一个或某些未知量表征所测得的观测值,常用到参数估计或曲线拟合中<sup>[24]</sup>。利用最小二乘法进行曲线拟合,结果如图 13 所示。



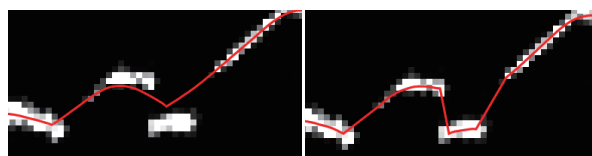
图 13 最小二乘法激光曲线拟合

Fig. 13 Least square method laser curve fitting

#### 3.3.3 对比分析

1) 拟合效果。闭运算和最小二乘法拟合效果对比如图 14 所示。对于多处断裂部分,可看出,闭运算处理由于采用膨胀算法,丢失了部分图像细节,导

致拟合曲线误差较大,而最小二乘法拟合的曲线精度较高。



(a) 闭运算拟合效果 (b) 最小二乘法拟合效果

图 14 闭运算和最小二乘法拟合效果对比

Fig. 14 Comparison between closed operations and least square method

2) 拟合时间。利用 HALCON 中的 count\_seconds 算子计算算法的执行时间,得到闭运算的拟合时间为 2.171 ms,最小二乘法拟合时间为 3.082 ms,表明闭运算处理的拟合时间较短。

闭运算和最小二乘法性能对比见表 4。2 种算法的提取精度都是亚像素级别,但是针对多处断裂细节,最小二乘法明显优于形态学处理的闭运算方法,在提取速度方面,最小二乘法也可满足实验要求。因此,本文选取最小二乘法作为激光条纹断裂修补算法。

表 4 闭运算和最小二乘法性能对比

Table 4 Comparison of performance between closed operations and least square method

拟合方法	拟合效果	提取精度	提取速度/ms	复杂度
闭运算	差	亚像素	2.171	简单
最小二乘法	好	亚像素	3.082	较复杂

## 4 煤流量计算

### 4.1 煤流截面积计算模型

煤流截面积计算模型如图 15 所示。设条纹曲线函数为  $f(x)$ ,利用黎曼积分方程可得  $x$  轴上从  $a$  点到  $b$  点这一段曲线与  $x$  轴围成的区域面积:

$$S = \int_a^b f(x)dx \tag{4}$$

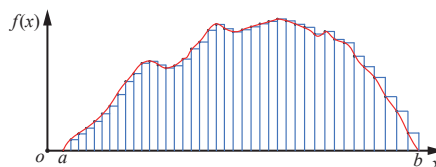


图 15 煤流截面积计算模型

Fig. 15 Calculation model of coal flow cross-section

图像由像素点组成,且每个像素点的坐标是离散的。像素大小由图像分辨率决定,实验图像的分辨率为  $1280 \times 1024$ 。 $[a, b]$  区间共包含 1280 个点,将其分为 1280 个子区间:  $[x_0, x_1], (x_2, x_3), \dots, (x_{1279}, x_{1280})$ ,其中  $x_0 = a, x_{1280} = b$ ,各区间的长度  $\Delta x_i = x_{i+1} -$

$x_i(0 \leq i \leq 1279)$ , 则面积可表示为

$$S = \sum_{i=0}^{1279} f(x_i) \Delta x_i \quad (5)$$

进行相机标定, 并将激光条纹的图像坐标和世界坐标进行一一对应, 得到真实的点数据。设激光条纹像素点坐标  $x$  在世界坐标中的映射值为  $X$ , 则像素点序号  $N$  与  $X$  的对应关系如图 16 所示。可看出,  $N$  与  $X$  之间呈线性关系, 即相邻 2 点之间横坐标的差值相同。因此, 对煤流横截面积计算模型进行进一步简化, 将  $\Delta x_i$  变换为常量  $d$ , 得

$$S = d \sum_{i=0}^{1279} f(x_i) \quad (6)$$

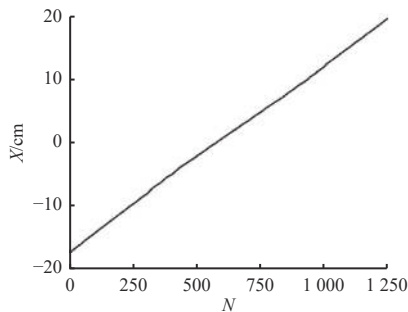


图 16 激光条纹像素点序号与  $x$  方向真实世界坐标对应关系  
Fig. 16 Correspondence between the pixel number of laser stripes and the real-world coordinates in the  $x$  direction

#### 4.2 煤流体积检测模型

煤流体积检测模型如图 17 所示。设带式输送机以速度  $v$  匀速直线运行, 相机的帧速率为  $\sigma$ , 第  $1, 2, \dots, m$  帧煤堆截面积为  $S(1), S(2), \dots, S(m)$ , 则煤流体积可近似表示为

$$V = \sum_{j=1}^m S(j)(y_{j+1} - y_j) \quad (7)$$

式中  $y_{j+1} - y_j$  为相机第  $j$  帧到第  $j+1$  帧之间带式输送机运行的距离, 可表示为

$$y_{j+1} - y_j = vt_j \quad (8)$$

式中  $t_j$  为第  $j$  帧到第  $j+1$  帧所用的时间。

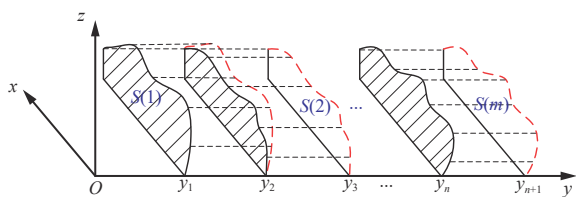


图 17 煤流体积检测模型

Fig. 17 Coal flow volume detection model

用帧速率  $\sigma$  替换  $t_j$ , 得到化简后的煤流体积公式:

$$V = \sum_{j=1}^m S(j)v \frac{1}{\sigma} \quad (9)$$

式(9)中  $v$  和  $\sigma$  为定值, 通过计算每一帧上煤堆的截面积, 即可得出煤流体积。

### 5 实验验证

#### 5.1 激光条纹提取精度验证

通过对标准模型(图 18)的宽度、高度和面积测量, 验证煤流检测系统标定和激光条纹提取精度。

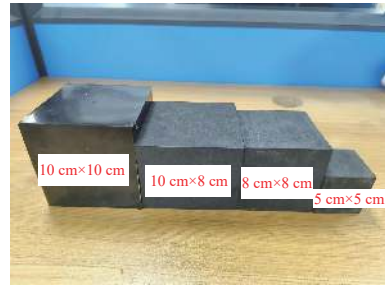


图 18 标准模型

Fig. 18 Standard model

经过算法处理得到标准模型激光条纹拟合曲线, 如图 19 所示。

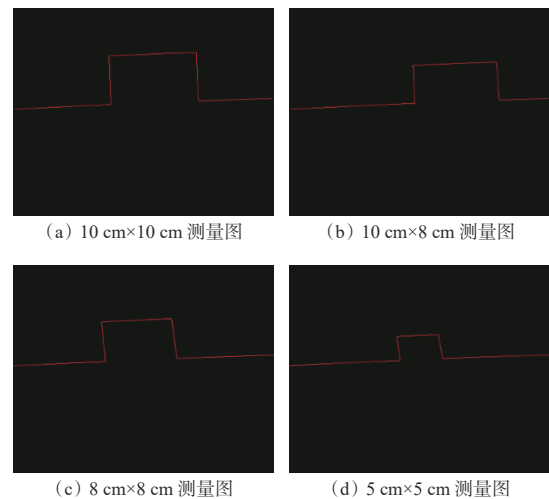


图 19 标准模型激光条纹拟合曲线

Fig. 19 Standard model laser stripe fitting curves

提取激光条纹上的像素坐标信息, 转换为三维坐标信息, 得到世界坐标, 如图 20 所示, 其中  $Z$  为激光条纹像素点坐标  $z$  在世界坐标中的映射值。

标准模型检测结果见表 5。可看出, 宽度最大误差为 0.69%, 高度最大误差为 -0.83%, 面积最大误差为 1.36%。检测误差较小, 验证了煤流检测系统激光条纹提取算法的合理性。

#### 5.2 煤流体积计算实验验证

准备 6 组煤堆, 体积分别为 295.4, 498.0, 617.4, 725.7, 773.4, 956.5  $\text{cm}^3$ , 密度为 1.98  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 使用煤流

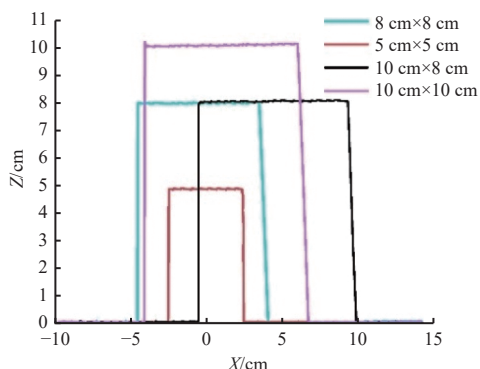


图 20 标准模型世界坐标

Fig. 20 Standard model world coordinates

表 5 标准模型检测结果

Table 5 Standard model detection results

尺寸/cm	宽度/cm	宽度误差/%	高度/cm	高度误差/%	面积/cm <sup>2</sup>	面积误差/%
5×5	5.029	0.58	4.958 5	-0.83	24.937	-0.25
8×8	8.055	0.69	8.004 6	0.06	64.476	0.74
10×8	10.050	0.50	7.990 9	-0.11	80.318	0.40
10×10	10.060	0.60	10.080 0	0.80	101.360	1.36

检测系统测量煤堆体积,结果见表 6。可看出,当带速分别为 0.25, 0.5, 1 m/s 时,煤流检测系统误差均较小,最大误差分别为 2.78%, 3.61% 和 3.89%,表明基于机器视觉的煤流检测系统具有较高准确性。

表 6 煤堆体积测量结果

Table 6 Measurement results of coal pile volume

实际 体积/cm <sup>3</sup>	带速为0.25 m/s		带速为0.5 m/s		带速为1 m/s	
	测量值/cm <sup>3</sup>	误差/%	测量值/cm <sup>3</sup>	误差/%	测量值/cm <sup>3</sup>	误差/%
295.4	301.6	2.09	302.0	2.21	304.9	3.22
498.0	503.7	1.14	508.9	2.19	514.8	3.37
617.4	633.0	2.53	639.7	3.61	640.5	3.74
725.7	745.9	2.78	749.4	3.27	753.9	3.89
773.4	792.5	2.47	794.6	2.73	795.4	2.84
956.5	957.0	0.05	968.5	1.26	973.5	1.78

## 6 结论

1) 利用区域骨架法提取激光条纹中心,不仅不会改变原本的激光条纹形状,而且可保留细节信息,相较于灰度重心法应用效果更好。

2) 采用最小二乘法进行激光条纹断裂修补,相较于闭运算,最小二乘法拟合处理的平滑效果更好,精度较高。

3) 对标准模型的宽度、高度和面积进行测量,误差均在 1.5% 以下,验证了煤流检测系统标定和激光条纹中心提取算法的精度。

4) 煤流体积测量实验结果表明,当带速分别为 0.25, 0.5, 1 m/s 时,煤流检测系统误差均较小,最大误差分别为 2.78%, 3.61% 和 3.89%,验证了煤流检测系统具有较高的准确性。

### 参考文献(References):

[1] 李晓丽,王庆福. 基于 GA-BP 神经网络的带式输送机故障监测系统研究[J]. 煤炭技术, 2021, 40(12): 222-224.  
LI Xiaoli, WANG Qingfu. Research on fault monitoring system of belt conveyor based on GA-BP neural network[J]. Coal Technology, 2021, 40(12): 222-224.

[2] 宋钦一. 基于故障树和贝叶斯网络的带式输送机故障诊断[J]. 矿山机械, 2022, 50(9): 55-58.  
SONG Qinyi. Fault diagnosis on belt conveyor based on fault tree and Bayesian network[J]. Mining & Processing Equipment, 2022, 50(9): 55-58.

[3] GAN Hong, CHEN Kun, ZHONG Xinghong. Static analysis on the measurement system of an electronic belt scale[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 345: 525-529.

[4] 赵学军,杨征,闫雪. 基于语义分割的带式输送机物料运输区域检测算法[J]. 计算机应用与软件, 2024, 41(2): 56-61, 99.  
ZHAO Xuejun, YANG Zheng, YAN Xue. Coal transportation area detection algorithm of belt conveyor based on semantic segmentation[J]. Computer Applications and Software, 2024, 41(2): 56-61, 99.

[5] 张文科,郭瑜,赵辉. 基于图像识别的煤矿带式输送机自适应调速系统设计[J]. 煤炭工程, 2024, 56(1): 220-224.  
ZHANG Wenke, GUO Yu, ZHAO Hui. Self-adaptive speed control system of coal mine conveying belt based on image recognition[J]. Coal Engineering, 2024, 56(1): 220-224.

[6] 汪心悦,乔铁柱,庞宇松,等. 基于 TOF 深度图像修复的输送带煤流检测方法[J]. 工矿自动化, 2022, 48(1): 40-44, 63.  
WANG Xinyue, QIAO Tiezhu, PANG Yusong, et al. Coal flow detection method for conveyor belt based on TOF depth image restoration[J]. Industry and Mine Automation, 2022, 48(1): 40-44, 63.

[7] 周富林,黄靖. AI 边缘计算在工业视觉识别系统中的应用[J]. 现代传输, 2022(6): 54-56.  
ZHOU Fulin, HUANG Jing. Application of AI edge computing in industrial visual recognition system[J]. Modern Transmission, 2022(6): 54-56.

[8] 李纪栋,蒲绍宁,翟超,等. 基于视频识别的带式输送机煤量检测与自动调速系统[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(8): 212-216.  
LI Jidong, PU Shaoning, ZHAI Chao, et al. Coal quantity detection and automatic speed regulation system of belt conveyor based on video identification[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(8): 212-216.

[9] 杨春雨,顾振,张鑫,等. 基于深度学习的带式输送机煤流量双目视觉测量[J]. 仪器仪表学报, 2021,



- 41(8): 164-174.  
YANG Chunyu, GU Zhen, ZHANG Xin, et al. Binocular vision measurement of coal flow of belt conveyors based on deep learning[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 41(8): 164-174.
- [10] 曾飞, 吴青, 初秀民, 等. 带式输送机物料瞬时流量激光测量方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(2): 40-47.  
ZENG Fei, WU Qing, CHU Xiumin, et al. Measurement of material instantaneous flow on belt conveyors based on laser scanning[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(2): 40-47.
- [11] 胡而已. 融合激光扫描与机器视觉的煤流量测量研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(11): 146-151.  
HU Eryi. Coal flow measurement based on laser scanning and machine vision[J]. Coal Engineering, 2021, 53(11): 146-151.
- [12] 李淑军, 田昌勇, 周传扬. 基于结构光的激光自动焊接跟踪研究[J]. 应用光学, 2023, 44(6): 1280-1285.  
LI Shujun, TIAN Changyong, ZHOU Chuanyang. Research on automatic laser welding tracking based on structured light[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(6): 1280-1285.
- [13] 朱铮涛, 裴炜冬, 李渊, 等. 基于远心镜头的激光三角测距系统研究与实现[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 191-196.  
ZHU Zhengtao, PEI Weidong, LI Yuan, et al. Research and implementation of laser triangulation system based on telecentric lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 191-196.
- [14] 祝磊, 韩自营, 阮宇静, 等. 基于机器视觉的轮胎胎面检测系统设计与实现[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(6): 1782-1787.  
ZHU Lei, HAN Ziyang, RUAN Yujing, et al. Design and implementation of tire tread detection system based on machine vision[J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39(6): 1782-1787.
- [15] 郑彬, 罗山, 蒋银成. 基于RGB图像处理的轮胎胎面缺陷检测方法研究[J]. 制造业自动化, 2023, 45(6): 35-38, 49.  
ZHENG Bin, LUO Shan, JINAG Yincheng. Research on tire tread defect detection method based on RGB image processing[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(6): 35-38, 49.
- [16] 唐义杰, 胡超, 张倚玮, 等. 强椒盐噪声下的模糊边缘自适应中值滤波算法[J]. 电子制作, 2022, 30(16): 89-91.  
TANG Yijie, HU Chao, ZHANG Yiwei, et al. Fuzzy edge adaptive median filtering algorithm under strong salt and pepper noise[J]. Practical Electronics, 2022, 30(16): 89-91.
- [17] 刘传洋, 吴一全. 基于红外图像的电力设备识别及发热故障诊断方法研究进展[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-27[2024-04-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240226.0957.002.html>.
- LIU Chuanyang, WU Yiquan. Research progress on power equipment identification and heating fault diagnosis methods based on infrared images[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-27[2024-04-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240226.0957.002.html>.
- [18] 宋立彬, 张淑艳. 基于机器视觉的煤流量快速检测方法[J]. 煤炭技术, 2023, 42(9): 241-243.  
SONG Libin, ZHANG Shuyan. Rapid detection method of coal flow based on machine vision[J]. Coal Technology, 2023, 42(9): 241-243.
- [19] 吴玉波, 陈迪来, 杨超, 等. 基于Steger算法的多线结构光中心提取[J]. 应用激光, 2023, 43(10): 188-195.  
WU Yubo, CHEN Dilai, YANG Chao, et al. Multi-line structured light center extraction based on improved steger algorithm[J]. Applied Laser, 2023, 43(10): 188-195.
- [20] 陈哲, 王生怀, 钟明. 3D线激光相机的激光条纹中心提取方法[J]. 工具技术, 2023, 57(10): 155-160.  
CHEN Zhe, WANG Shenghuai, ZHONG Ming. Laser stripe center extraction method for 3D line laser cameras[J]. Tool Engineering, 2023, 57(10): 155-160.
- [21] 胡石. 基于激光扫描的工业机器人焊接焊缝跟踪方法[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2023, 25(5): 69-75.  
HU Shi. Study on welding seam tracking method of industrial robot based on laser scanning[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2023, 25(5): 69-75.
- [22] 王浩, 赵小辉, 徐龙哲, 等. 结构光视觉辅助焊接的轨迹识别与控制技术[J]. 焊接学报, 2023, 44(6): 50-57, 132.  
WANG Hao, ZHAO Xiaohui, XU Longzhe, et al. Research on trajectory recognition and control technology of structured light vision-assisted welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(6): 50-57, 132.
- [23] 南诺, 侯作勋, 曹东晶, 等. 一种基于图像形态学的深空图像模糊复原方法[J]. 航天返回与遥感, 2023, 44(2): 101-108.  
NAN Nuo, HOU Zuoxun, CAO Dongjing, et al. Deep-air image blur restoration method based on image morphology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2023, 44(2): 101-108.
- [24] 田江云, 温欣, 刘旭东, 等. 基于改进最小二乘法的椭圆形玻璃幕墙缺陷多传感器融合检测技术[J]. 无损检测, 2024, 45(1): 28-32.  
TIAN Jiangyun, WEN Xin, LIU Xudong, et al. Multi-sensor fusion detection technology for elliptical glass curtain wall defects based on improved least squares method[J]. Nondestructive Testing, 2024, 45(1): 28-32.