

文章编号 1004-924X(2023)12-1793-11

# 融入一维概率 Hough 变换与局部 Zernike 矩的 双目视觉测量

张 浩, 许四祥\*, 董晨晨, 周书华  
(安徽工业大学 机械工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

**摘要:**针对被测物体理想角点不易检测致使测量精度不高的问题,提出一种融入一维概率 Hough 变换与局部 Zernike 矩的双目视觉测量方法。首先利用一维概率 Hough 变换对物体外轮廓边缘进行直线检测;然后根据直线检测结果建立感兴趣区域,在各局部区域内利用 Zernike 矩进行亚像素检测,并在两相邻感兴趣区域的相交范围内完成亚像素点筛选;之后通过正交总体最小二乘法进行亚像素边缘直线拟合,并进行关键点匹配;最后利用三角测量原理获得被测物体的三维空间信息完成测量。以连铸坯模型为测量对象,实验结果表明:此算法最小相对误差达到 0.340 1%,满足测量要求。长度相对误差均值为 0.394 5%,与传统 SIFT, ORB 算法相比分别降低 80.01% 和 74.63%;与其他边缘拟合算法相比测量误差减小 34.11%,运行时间缩短 39.07%,验证了此算法的精确性和高效性。

**关键词:**双目视觉;一维概率 Hough 变换;亚像素;边缘拟合;测量

**中图分类号:** TP394.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233112.1793

## Binocular vision measurement method incorporating one-dimensional probabilistic Hough transform and local Zernike moment

ZHANG Hao, XU Sixiang\*, DONG Chenchen, ZHOU Shuhua

(College of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China)

\* Corresponding author, E-mail: xsxhust@ahut.edu.cn

**Abstract:** To address the low measurement accuracy resulting from the inability to detect ideal corners of an object, a binocular-vision-based measurement method incorporating the one-dimensional probabilistic Hough transform and local Zernike moment is proposed herein. First, the one-dimensional probabilistic Hough transform is used for line detection of the outer contour. Next, sub-pixel extraction is performed using the Zernike moment method in the region of interest (ROI) established according to the line detection, and sub-pixel points are screened in the intersection region of the ROI. Then, before matching the key points, sub-pixel edge lines are fitted using the orthogonal total least squares method. Finally, the three-dimensional spatial information of a continuous casting slab model is obtained via the triangulation principle, and the measurement is completed. Here, the continuous casting slab model is considered as the measurement object. Experimental results indicate that the minimum relative error of the proposed algorithm is 0.340 1%, which satisfies the measurement requirement. The average relative error in the length is

收稿日期:2022-10-15;修订日期:2022-11-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51374007);安徽高校自然科学研究重点资助项目(No. KJ2020A0259);特种重载机器人安徽重点实验室开放基金资助项目(No. TZJQR005-2021)

0.3945%, which is 80.01% and 74.63% smaller than those of the traditional SIFT and ORB algorithms, respectively. Compared with another method based on edge fitting, the measurement error and time consumption of the proposed algorithm are reduced by 34.11% and 39.07%, respectively, confirming its measurement accuracy and efficiency.

**Key words:** binocular vision; one-dimensional probabilistic hough transform; sub-pixel; edge fitting; measurement

## 1 引言

现代钢铁冶金行业多使用数控火焰切割机对连铸坯进行定尺切割,此时熔融钢液会在连铸坯切面底部凝结成不规则的硬质毛刺,这不仅会损害辊道表面,还会降低最终轧材的质量。为此本课题组提出一种等离子弧去毛刺方案<sup>[1]</sup>,为了使机器人精确切除连铸坯上的毛刺,避免出现漏切、错切现象,需先获取连铸坯在辊道上的位姿。鉴于双目视觉测量方法具有高效率、非接触等优点,因此引入双目立体视觉系统对连铸坯进行定位与测量。杨宇等<sup>[2]</sup>利用改进 ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) 算法进行双目视觉测量,对特征点邻域进行高斯加权并引入字符串描述子进行描述,实现较好的定位测量效果; XU 等<sup>[3]</sup>对 BRISK (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints) 算法进行改进,通过去除低偏移值区域来确定特征点主方向,并根据差异阈值生成描述符以完成匹配,改善了匹配与测量效果。宋超群等<sup>[4]</sup>通过简化 FAST (Features from Accelerated Segment Test) 算法检测模板,抑制了角点聚簇现象,并利用像素点邻域灰度均值生成描述子,提高了匹配准确率和测量精度。上述测量方法均基于角点检测实现,直接提取出具有重要信息的特征点,方便快捷。但是这种方法对被测物体要求较高,只有棱角清晰完整才能检测到理想的定位角点。

相较于点特征,线特征受外界环境和拍摄视角变化的影响较小,稳定性更高。因此对于边缘规则但角点不明显的物体,常考虑采用基于边缘拟合的方法进行测量,即根据边缘类型使用直线<sup>[5]</sup>或圆<sup>[6]</sup>等拟合被测物体的边缘。刘怀广等<sup>[7]</sup>提出用局部极值差分对锂电池涂布边界进行逐级定位,再使用三次样条插值分段拟合亚像素边缘,实现涂布边缘的高精度定位;周静等<sup>[8]</sup>将多尺

度思想应用到边缘提取中,并通过分段拟合的方法筛选出所需的规则边缘,对陶瓷过滤网进行尺寸测量与缺陷检测,但亚像素检测的缺失导致测量精度仍有一定提升空间; FANG 等<sup>[9]</sup>通过 Zernike 矩提取亚像素边缘,对所得亚像素点进行聚类后使用最小二乘法拟合边缘直线以完成测量,但是聚类过程的存在限制了计算速度的提升。

针对上述问题,本文提出一种基于边缘拟合的双目视觉测量方法用于实现连铸坯的精确高效测量。首先采用具有多尺度思想的一维概率 Hough 变换提取连铸坯模型的整像素级外轮廓直线;然后在感兴趣区域 (Region of Interest, ROI) 内进行 Zernike 矩亚像素检测,并在 ROI 相交区域内完成亚像素筛选,提高检测效率;最后利用正交总体最小二乘法拟合亚像素边缘直线,得出关键点坐标并完成测量工作。

## 2 测量方案

本文采用边缘拟合的方法测量连铸坯模型的尺寸,流程如图 1 所示。主要包含以下步骤:双目相机标定与图像校正、直线提取、亚像素检测与筛选、边缘拟合、匹配和测量等。

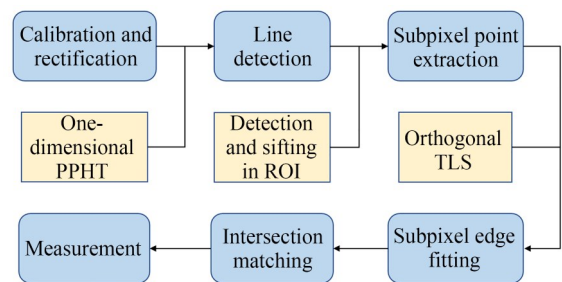


图 1 连铸坯模型测量流程

Fig. 1 Measurement process of continuous casting slab model

### 2.1 相机标定与图像校正

作为视觉测量的基础环节,相机标定的结果优劣对测量系统的精度起着决定性的作用。通过双目相机标定可以求出两相机的内参数矩阵和左右相机的相对位置关系等,建立成像几何模型,进而根据左右图像中的匹配点对确定相应点的空间三维坐标<sup>[10]</sup>。本文使用 MATLAB 标定工具箱,采用张正友标定法<sup>[11]</sup>完成双目相机标定。

由于手动调节左右相机位置无法保证两光轴完全平行,需进行立体校正<sup>[12]</sup>以使两图像完全共面行对准,这利于提高后续立体匹配的效率并简化立体视差计算。本文利用相机标定所得参数在 MATLAB 中完成双目立体校正。

### 2.2 基于倾斜角投票和 Freeman 链码的直线检测

提取连铸坯模型图像的直线特征可以初步

定位其外轮廓边缘直线。作为常用的直线检测算法,概率 Hough 变换(Progressive Probabilistic Hough Transform, PPHT)<sup>[13]</sup>通过随机采样的方式检测边界点,其执行效率较经典 Hough 变换有明显提高,但仍有内存消耗大、计算复杂度高等不足。李雪山等<sup>[14]</sup>针对实际工况对概率 Hough 变换的角度检测范围加以限制,效率虽有提升但普适性欠佳。CHUTATAPE O 等<sup>[15]</sup>则运用一维累加器简化原有的 Hough 二维参数空间,根本上节省存储空间和计算时间。陈珂等<sup>[16]</sup>用 Hough 一维空间变换完成了快速圆检测,刁燕等<sup>[17]</sup>也利用一维投票机制的概率 Hough 变换算法实现了有序边界情况下的直线检测。受此启发并为了实现直线段端点的精确定位,本文提出基于倾斜角投票和 Freeman 链码的一维概率 Hough 直线检测方法。流程如图 2 所示,具体实现步骤如下:

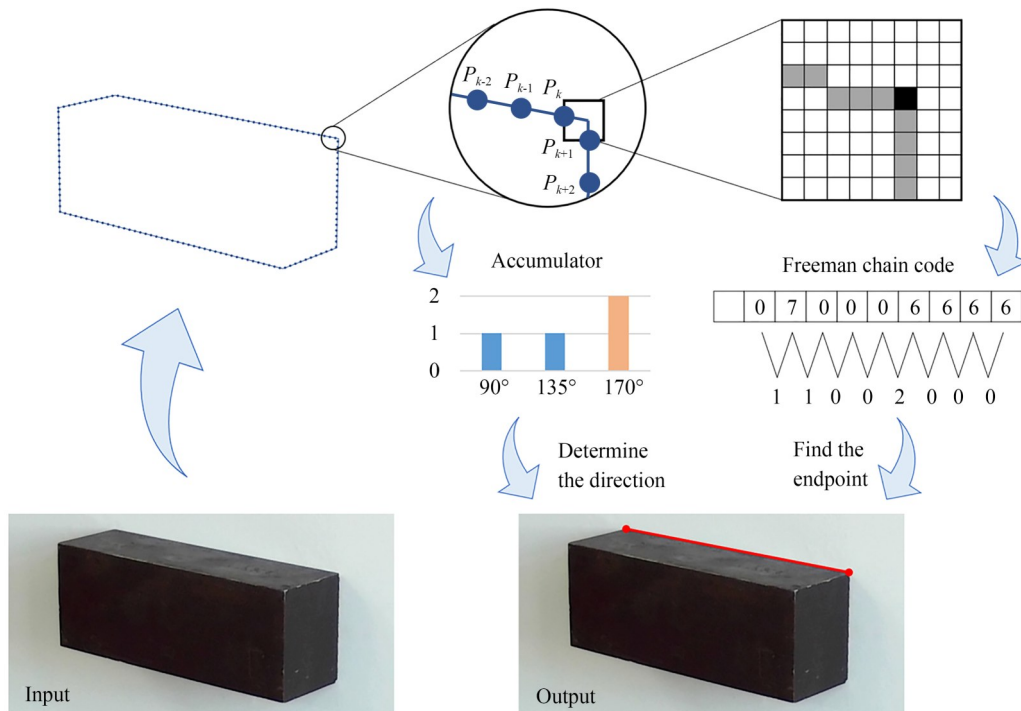


图 2 直线检测示意图

Fig. 2 Schematic diagram of line detection

Step 1:对输入图像进行引导滤波保边去噪,并通过自适应阈值二值化和 Canny 边缘检测获得连铸坯模型的外轮廓后,进行边界跟踪,以 10 pixels 为间隔沿着边缘轮廓进行采样并标记序号;

Step 2:随机选取某个边缘采样点  $P_k$  ( $k$  为此点对应的序号),与前后相邻的各 2 个点组成有序集合  $S = \{P_i | i = k - 1, k - 2, k, k + 1, k + 2\}$ ,计算各相邻采样点之间连线的倾斜角  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ ,其中  $\theta \in [0, \pi)$ ;

Step 3: 使用初始值为 0 且分辨率为  $\pi/180$  的一维累加器对倾斜角  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  进行投票, 若有投票结果达到所设阈值  $T$  (此处  $T=2$ ) 且其对应的所有采样点连续, 则认为此局部区域存在直线且上述连续采样点都在此直线上, 其对应的角度即为目标直线的倾斜角  $\theta_m$ , 执行 Step 4, 否则返回 Step 2 重新选点;

Step 4: 从上述连续采样点向两端延伸, 直到两相邻采样点之间连线的倾斜角不等于  $\theta_m$ , 线段端点便在此两点之间, 执行 Step 5;

Step 5: 对上述采样点间的边缘轮廓进行 8 方向 Freeman 编码, 并根据其差分码查找线段端点, 如式 (1) 所示:

$$d_i = \begin{cases} |a_{i+1} - a_i|, & |a_{i+1} - a_i| \in [0, 4] \\ 8 - |a_{i+1} - a_i|, & |a_{i+1} - a_i| \in (4, 7] \end{cases}, \quad (1)$$

其中:  $i \in (0, 10)$ , 为两采样点之间轮廓像素的序号;  $a_i$  和  $d_i$  分别为第  $i$  个像素的链码方向值及其前后两像素的一阶链码差。由于数字直线至多有两个方向码且它们在模 8 意义下相差为 1, 故若某像素点的链码差  $d_i > 1$ , 则认为该点为线段端点, 提取此线段并返回 Step 2 重新选点, 直至所有采样点均被检索;

Step 6: 计算并比较各线段的极角  $\theta$  和极径  $\rho$  以判断是否存在共线现象, 若存在且线段间隔不超过最大容许间距  $G_{\max}$ , 则对其进行连接。遍历所有线段, 按需整合后提取达到最短长度  $L_{\min}$  的

线段, 按采样点序号依次输出。

此方法依据采样点连线的倾斜角投票结果来确定直线方向, 用一维累加器取代传统 PPHT 的二维累加器, 节约了内存空间, 并根据数字直线的 Freeman 链码特征实现线段端点的精确定位, 具有多尺度的思想, 提高了直线检测效率。

### 2.3 局部区域内亚像素检测与筛选

整像素级检测方法已无法满足视觉测量对边缘检测的高精度要求, 故需引入亚像素边缘检测。其中, Zernike 矩方法<sup>[18]</sup>因在抗噪性和易用性上表现均衡而受到广泛应用, 但其输出边缘较粗。文涛等<sup>[19]</sup>在使用 Zernike 矩检测亚像素前引入小波变换进行粗定位, 信噪比较高, 但需多次实验以确定合适阈值。HUANG 等<sup>[20]</sup>将 Canny 算子与最大类间方差法结合提取出像素边缘后, 用 Zernike 矩方法实现亚像素定位, 提高检测精度的同时减少耗时。本文使用 Canny-Zernike 矩方法进行亚像素检测。

要测量连铸坯模型的外形尺寸, 仅需对外轮廓进行检测即可。全局遍历不仅耗时, 而且会提取到不需要的亚像素点。并且, 边缘拟合前需先对亚像素点进行聚类, 但其多次迭代会增加运行时间, 角点附近区域的亚像素点也有可能被误分类, 影响边缘拟合效果。针对以上问题, 本文在 ROI 内进行亚像素检测并在 ROI 相交区域内筛选亚像素点, 示意图如图 3 所示, 具体实现步骤如下:

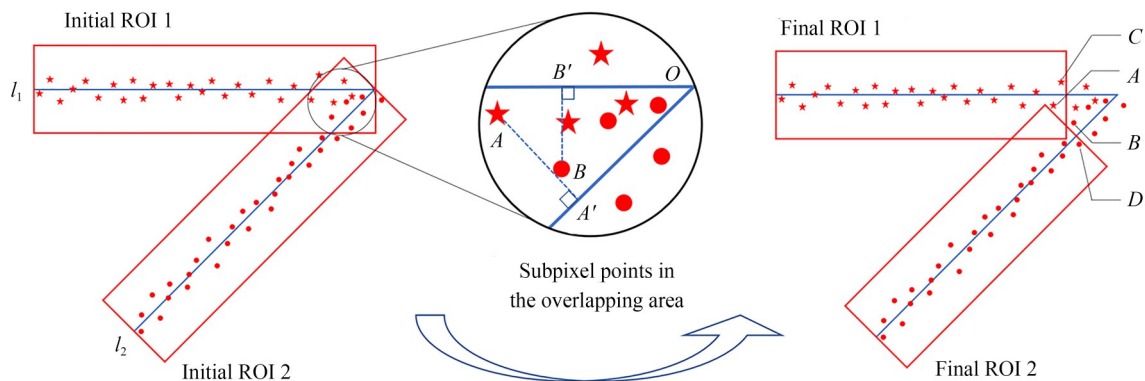


图 3 亚像素点提取与筛选示意图

Fig. 3 Schematic diagram of subpixel point extraction and sifting

Step 1: 以直线检测提取到的线段为中心线, 建立宽度为  $2r$  (本文设  $r$  为 10 pixels) 的初始矩形

ROI;

Step 2: 在此局部区域内运用 Canny 算子进

行边缘粗定位后,用 Zernike 矩提取亚像素特征;

Step 3:判断相邻边缘直线  $l_1, l_2$  的 ROI 是否相交且相交区域内是否存在亚像素点,若存在,则提取这些亚像素点并执行 Step 4,否则跳至 Step 6;

Step 4:计算上述亚像素点到两直线的欧式距离并进行比较,距离哪条直线更近,就认为该亚像素点应属于此直线,由此完成分类,图 3 中隶属于两相邻直线  $l_1, l_2$  的亚像素点分别用星形和圆点表示;

Step 5:在 ROI 相交区域内分别沿着两直线  $l_1, l_2$  依次检索,找出距离两直线交点  $O$  最近的亚像素点  $A, B$ ,将点  $A, B$  在直线  $l_2, l_1$  的投影分别设为点  $A', B'$ 。对于 ROI 1,删除点  $O, B'$  之间属于直线  $l_1$  的亚像素点,点  $C$  为 ROI 1 保留的最后一点;同理对于 ROI 2,删除点  $O, A'$  之间属于直线  $l_2$  的亚像素点,点  $D$  为 ROI 2 保留的最后一点;

Step 6:更新并保存 ROI 中的亚像素点,继续执行 Step 3,直至遍历所有边缘直线。

该方法仅在局部区域内进行检测亚像素检测,屏蔽非边缘区域的亚像素点,缩短了运行时间,提高了检测效率。经过亚像素筛选,相邻 ROI 之间的相交区域内不再有亚像素点,这意味着某一边缘直线的 ROI 中不会有其他直线的亚像素点存在,利于提高后续拟合的精确性。

## 2.4 拟合与匹配

亚像素检测误差的客观存在对拟合方法的鲁棒性和精确性提出一定要求。总体最小二乘法兼顾自变量和因变量的误差,与最小二乘法相比拟合效果更稳健,其中正交总体最小二乘法的运算逻辑较为合理,具有较高的拟合准确度和广泛的适用性<sup>[21]</sup>,求解过程如下:

设一个 ROI 中的亚像素点集为  $\{(x_i, y_i) | i = 1, 2, \dots, n\}$ ,分别计算自变量  $x$  和因变量  $y$  的总体均值,得到零均值矩阵  $M$ ,并对二阶方阵  $M^T M$

特征值分解,如式(2)~式(4)所示:

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \end{cases}, \quad (2)$$

$$M = \begin{bmatrix} x_1 - \bar{x} & x_2 - \bar{x} & \cdots & x_n - \bar{x} \\ y_1 - \bar{y} & y_2 - \bar{y} & \cdots & y_n - \bar{y} \end{bmatrix}^T, \quad (3)$$

$$M^T M = U \Sigma U^T = [u_1 \quad u_2] \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^T \\ u_2^T \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中:  $u_1, u_2$  分别为特征值  $\sigma_1, \sigma_2 (\sigma_1 > \sigma_2)$  对应的特征向量,  $u_2 = [a \quad b]^T$  为正交总体最小二乘的解,从而解得拟合直线方程:

$$a(x - \bar{x}) + b(y - \bar{y}) = 0. \quad (5)$$

依次遍历各 ROI 拟合出所有亚像素边缘直线,相邻两直线的交点即是定位关键点。要实现立体定位测量,需先将左右图像上的对应关键点进行匹配。在平行双目视觉模型中,空间内某一点在左右图像坐标系上的两投影一定是匹配点对,两投影点的齐次坐标  $p_l$  与  $p_r$  满足式(6)<sup>[22]</sup>:

$$\|p_r^T F p_l\| < \epsilon, \quad (6)$$

其中:  $F$  为基本矩阵,表述同一空间点在两像平面上的坐标对应关系;阈值  $\epsilon$  在理想情况下应为无穷小,依据实际情况选取合适值。由此获得匹配点对,再根据视差和三角测量原理获取关键点的三维坐标,即可完成连铸坯模型的尺寸测量。

## 3 实验结果

### 3.1 相机标定及校正结果

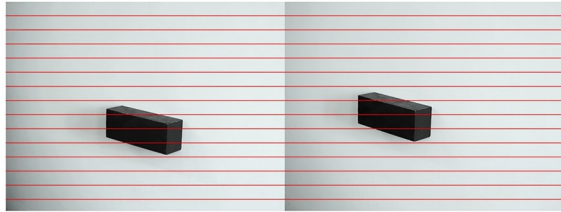
本文使用单格尺寸为  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  的  $12 \times 9$  棋盘格标定板,采集了 35 组分辨率为  $1\,600 \text{ pixels} \times 1\,200 \text{ pixels}$  的标定板图像进行相机标定,标定结果如表 1 所示。标定后的平均重投影误差为 0.38 pixels,最大重投影误差为 0.46

表 1 双目系统标定结果

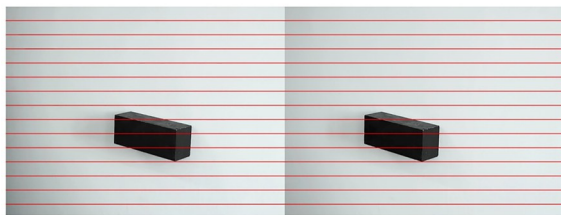
Tab. 1 Calibration result of binocular system

Intrinsic parameters			Extrinsic parameters						
Left camera			Right camera			Rotation matrix $R$		Translation matrix $T$	
2179.7	-0.858 56	930.05	2 169.0	0.504 31	862.91	0.999 8	-0.002 7	0.033 4	-100.026 0
0	2 177.9	615.66	0	2 166.6	540.57	0.002 7	1.000 0	0.006 9	0.335 7
0	0	1	0	0	1	-0.033 4	-0.006 9	0.999 8	-12.580 5

pixels,可应用于实际测量。利用标定结果对连铸坯模型图像进行校正,校正效果如图4所示。



(a) 原图  
(a) Original image



(b) 立体校正后的图像  
(b) Images after stereo rectification

图4 立体校正效果

Fig. 4 Stereo rectification effect

### 3.2 直线检测效果

经校正后的连铸坯模型左右图像已满足双目视觉测量的要求,进行像素级直线检测。为验

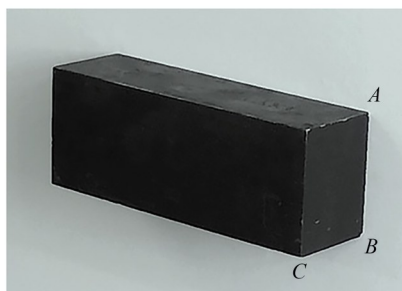
证本文改进概率 Hough 算法的优越性,选用 PPHT, LSD (Line Segment Detector), EDLines (Edge Drawing Lines), 文献[17]算法进行对比实验。以左相机所摄图像为例展示实验效果,各算法输入图像所经历的预处理参数一致,实验结果如图5和表2所示。

表2 直线检测算法效果对比

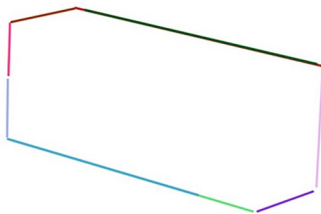
Tab.2 Performance comparison of line detection algorithms

Algorithm	Lines	Time/ms
PPHT	9	496
LSD	9	237
EDLines	7	186
Literature [17]	6	215
Ours	6	231

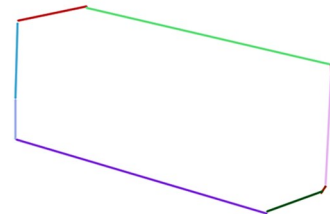
如图5(a)所示,此连铸坯模型的棱角A、B处均存在缺口,C处较圆滑,均不应被检测出直线。传统的PPHT存在直线断裂和重复检测现象,LSD,EDLines和文献[17]算法在缺口处或棱角不明显处均有直线过连接的问题。



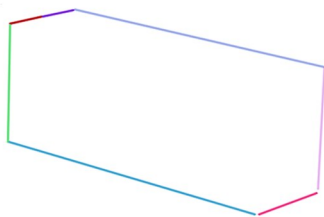
(a) 原图  
(a) Original image



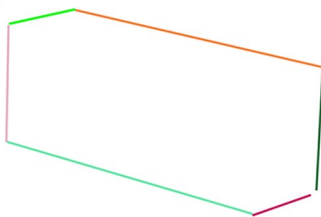
(b) PPHT  
(b) PPHT



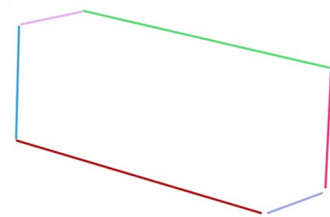
(c) LSD  
(c) LSD



(d) EDLines  
(d) EDLines



(e) 文献[17]算法  
(e) Literature [17]



(f) 本文算法  
(f) Proposed algorithm

图5 连铸坯模型图像直线检测结果

Fig. 5 Line detection of continuous casting slab model image

而本文提出的改进概率 Hough 算法有效规避了以上缺点,正好提取出连铸坯模型的六条边缘线段,无需进行直线筛选和整合,检测效果更佳。并且由表 2 可知,此方法与传统 PPHT 相比耗时缩短 53.43%,运行速度与以快速著称的 LSD 和 EDLines 相仿。与同为 PPHT 改进算法的文献[17]相比,本文利用 Freeman 链码查找线段端点,耗时虽略有增加,但端点检测效果更为合理。

3.3 亚像素检测与筛选效果

本文先根据直线检测结果建立 ROI 并提取其中的边缘亚像素点,再通过比较点到两直线的距离,对 ROI 相交区域中的亚像素点进行筛选。图 6 为连铸坯模型左上方顶点区域的亚像素点提取与筛选结果,属于两直线的亚像素点分别用星形和圆点表示。可见在角点附近区域,两相邻边缘直线的亚像素点经过筛选后不再混合在一起。由检测与筛选所得的连铸坯模型亚像素边缘点如图 7 所示。

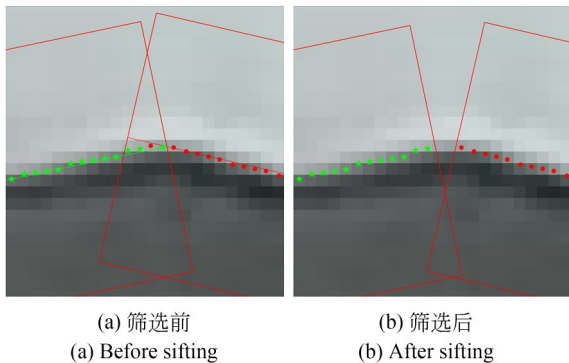


图 6 亚像素点筛选对比图

Fig. 6 Comparison of subpixel points sifting

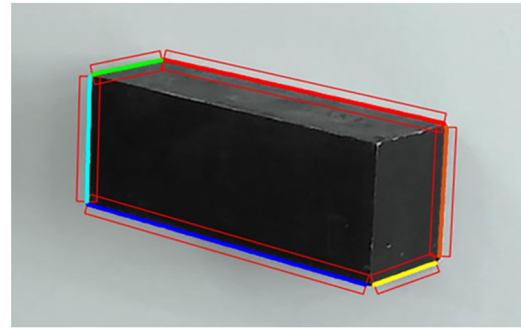


图 7 直线检测示意图

Fig. 7 Subpixel edge points

3.4 边缘拟合及测量结果

使用正交总体最小二乘法拟合出 6 条亚像素边缘直线,如图 8 所示。依次求相邻边缘直线的交点,即可确定关键点 ABCDEF 在像素坐标系下的二维坐标。再由式(6)完成匹配后,根据三角测量原理计算各关键点在世界坐标系下的三维坐标,结果如表 3 和图 9 所示。

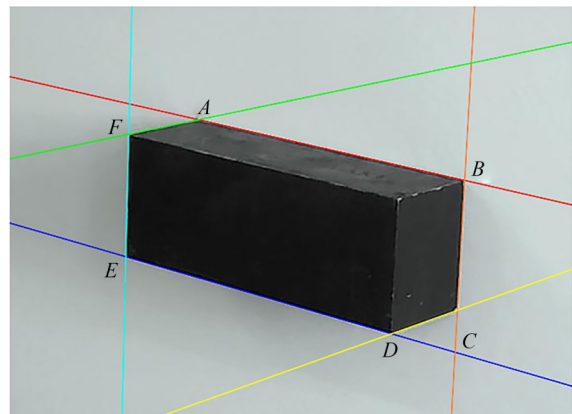


图 8 亚像素边缘直线及交点

Fig. 8 Subpixel edge lines and intersection points

表 3 关键点坐标

Tab. 3 Key point coordinates

Point	Pixel coordinates in the left image /pixel	Pixel coordinates in the right image /pixel	3D Coordinates in the world coordinate system /mm
A	(717.612 8, 601.743 8)	(559.356 6, 602.186 5)	(-52.072 9, 1.242 1, 1 377.660 5)
B	(1 066.879 6, 683.051 1)	(887.547 1, 683.517 1)	(148.857 0, 46.453 2, 1 215.748 3)
C	(1 057.525 9, 857.635 7)	(873.184 3, 857.963 8)	(139.736 7, 139.885 3, 1 182.713 2)
D	(971.936 0, 888.752 2)	(777.791 7, 889.220 2)	(88.583 9, 148.889 9, 1 122.995 8)
E	(622.165 6, 785.163 5)	(453.692 2, 785.872 3)	(-105.583 9, 110.145 7, 1 294.111 4)
F	(626.050 4, 621.140 0)	(460.914 7, 621.699 6)	(-105.364 8, 12.974 4, 1 320.267 5)

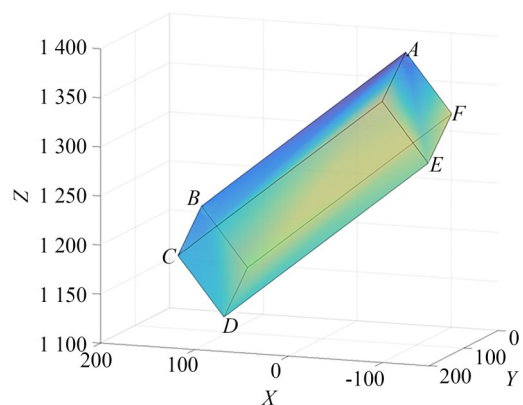


图9 连铸坯模型三维定位

Fig. 9 3D localization of continuous casting slab model

## 4 数据分析

### 4.1 测量结果分析

此实验所用连铸坯模型的公称尺寸为  $263 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 借助千分尺对其进行多次测量后取平均值, 测得实际尺寸为  $262.872 \text{ mm} \times 79.864 \text{ mm} \times 100.136 \text{ mm}$ 。各边长测量结果如表 4 所示, 最小相对误差为  $0.3401\%$ 。长 ( $AB$  和  $DE$  的平均值) 与高 ( $BC$  和  $EF$  的平均值) 的相对误差分别为  $0.3945\%$  和  $0.5549\%$ , 误差较小, 满足测量要求; 宽 ( $CD$  和  $FA$  的平均值) 的相对误差达到  $0.8702\%$ , 相对较大。原因可能如下: 相机标定结果存在误差; 连铸坯模型的宽边受拍摄角度影响在图像中畸变稍大; 宽边因长度较短导致所能检出的亚像素点较少。

### 4.2 对比分析

本文实验硬件环境为 AMD (R) Ryzen (TM) 7 4800H, 内存 8 GB; 软件平台为 VS 2013+OpenCV 3.0.0 和 MATLAB R2015b。对比实验程序为 SIFT, ORB 和文献[6]算法, 匹配效果如图 10 所示, 匹配运行时间和测量结果如表 5 所示。

表 4 连铸坯模型测量结果

Tab. 4 Measurement results of slab model

Edge	Measured value/mm	True value /mm	Absolute error/mm	Relative error/%
AB	261.978 0	262.872	-0.894 0	-0.340 1
BC	99.519 1	100.136	-0.616 9	-0.616 1
CD	79.144 5	79.864	-0.719 5	-0.900 9
DE	261.692 2	262.872	-1.179 8	-0.448 8
EF	100.630 2	100.136	0.494 2	0.493 6
FA	79.193 6	79.864	-0.670 4	-0.839 4

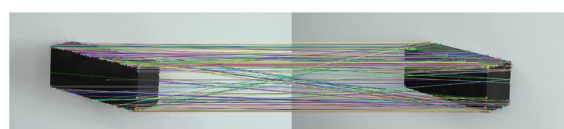
(a) SIFT  
(a) SIFT(b) ORB  
(b) ORB(c) 文献[6]算法  
(c) Literature [6] algorithm(d) 本文算法  
(d) Proposed algorithm

图 10 特征点匹配

Fig. 10 Feature point matching

表 5 测量精度与时间比较

Tab. 5 Comparison of measurement accuracy and time

Algorithm	Measured length/mm	True length/mm	Relative error/%	Time/ms
SIFT	257.684 3	262.872	-1.973 5	3 908
ORB	258.785 4	262.872	-1.554 6	434
Literature [6]	264.445 7	262.872	0.598 7	1 482
Ours	261.835 0	262.872	-0.394 5	903

上述四种测量算法分为两种思路:一是直接检测角点(SIFT和ORB),二是通过边缘拟合计算边缘直线交点(文献[6]和本文算法)。由图10和表5可知,SIFT算法存在关键特征点漏检现象,且运行时间最长;ORB算法各关键特征点均有检出,且运行速度快。不过它们均有以下弊端:一是由于此连铸坯模型个别顶点有缺损,不易直接检测到理想的定位角点,导致测量误差稍大;二是在角点检测与匹配后必须要经过筛选才能得到测量所需的匹配点对。文献[6]和本文算法规避了以上不利因素,利用边缘拟合直接输出六个定位关键点,对角点依赖程度不高且无需后续筛选。以测量连铸坯模型的长度为例,两边缘拟合算法的测量精度均明显高于两种角点检测算法,表明了边缘拟合方法的有效性,其中本文算法的测量精度较SIFT和ORB分别提高80.01%和74.63%。而与文献[6]算法相比,本文算法通过更合理的直线检测效果以及对亚像素进行筛选,相对误差减小34.11%,测量精度更高;并且仅在局部区域内检测亚像素,无需遍历整幅图像并进行亚像素聚类,运行时间缩短39.07%,测量效率有较大提升。但因仍需直线检测、亚像素点提取和拟合等一系列步骤,本文算法的运行

速度与以快著称的ORB相比仍显逊色。

## 5 结 论

针对被测物体理想角点不易检测导致测量精度不高的问题,提出一种融入一维概率Hough变换和局部Zernike矩检测的双目视觉测量方法。该方法首先采用一种基于倾斜角投票确定直线方向和Freeman链码确定线段端点的一维概率Hough变换进行像素级直线检测,降低了时间和内存消耗,高效且准确提取边缘直线;然后依据检测结果建立ROI,在此局部区域内使用Zernike矩方法检测亚像素点,并在ROI相交区域内进行亚像素点筛选,不仅有效缩短耗时,而且提高后续拟合的准确性;最后用正交总体最小二乘法进行边缘拟合,实现关键点定位,完成测量工作。利用连铸坯模型的图片进行双目视觉测量实验,实验结果表明,此方法的最小相对误差为0.3401%,且长度的相对误差均值为0.3945%,与传统SIFT和ORB算法相比分别下降80.01%和74.63%;与其他边缘拟合方法相比测量误差降低34.11%,运行时间缩短39.07%,验证了此测量算法的精确性与高效性,为后续机器人自主规划去毛刺轨迹提供依据。

## 参考文献:

- [1] 许四祥,陈富强,高培青,等.一种去除板坯毛刺的系统:CN201210459481.3[P].2014-10-15.  
XU S X, CHEN F Q, GAO P Q, *et al.* A system for removing burr from slab: CN201210459481.3 [P]. 2014-10-15. (in Chinese)
- [2] 杨宇,许四祥,方建中,等.基于改进ORB算法的双目视觉定位测量方法[J].传感技术学报,2019,32(11):1694-1699.  
YANG Y, XU S X, FANG J Z, *et al.* Location and measurement method of binocular vision based on improved ORB algorithm[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2019, 32(11): 1694-1699. (in Chinese)
- [3] XU S X, DONG C, ZHOU S H, *et al.* Binocular measurement method for the continuous casting slab model based on the improved BRISK algorithm[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(11): 3019.
- [4] 宋超群,许四祥,杨宇,等.基于改进FAST和BRIEF的双目视觉测量方法[J].激光与光电子学进展,2022,59(8):0810013.  
SONG C Q, XU S X, YANG Y, *et al.* Binocular vision measurement method based on improved FAST and BRIEF [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(8): 0810013. (in Chinese)
- [5] 张伟,韩宗旺,程祥,等.基于机器视觉零件轴线直线度误差测量的研究[J].光学精密工程,2021,29(9):2168-2177.  
ZHANG W, HAN Z W, CHENG X, *et al.* Research on straightness error measurement of part axis based on machine vision[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(9): 2168-2177. (in Chinese)
- [6] 周佳艺,石照耀,南浩轩,等.面向生产现场的注

- 塑齿轮快速分选检测系统[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9): 2017-2026.
- ZHOU J Y, SHI Z Y, NAN H X, *et al.* Rapid sorting and inspecting system for plastic gears in production site[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(9): 2017-2026. (in Chinese)
- [7] 刘怀广, 孔建益, 杨金堂, 等. 一种锂电池涂布在线测量边缘拟合方法[J]. 光电工程, 2019, 46(10): 180563.
- LIU H G, KONG J Y, YANG J T, *et al.* An edge fitting method for the online measurement of lithium battery coating [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(10): 180563. (in Chinese)
- [8] 周静, 董子昊, 任佳颖, 等. 基于多尺度边缘拟合的陶瓷过滤网质量检测方法[J]. 光子学报, 2021, 50(11): 1112004.
- ZHOU J, DONG Z H, REN J Y, *et al.* Quality inspection of ceramic filter based on multi-scale edge fitting[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 1112004. (in Chinese)
- [9] FANG J Z, XU S X, YANG Y, *et al.* Localization and measurement method of continuous casting slab model based on binocular vision [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, 62(1): 53-59.
- [10] 李勤文, 倪首军, 王志乾, 等. 非公共视场双目相机位姿标定[J]. 光学精密工程, 2020, 28(12): 2737-2744.
- LI Q W, NI S J, WANG Z Q, *et al.* Calibration of binocular camera with non-common field of view [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(12): 2737-2744. (in Chinese)
- [11] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [12] ZHONG F, QUAN C. Stereo-rectification and homography-transform-based stereo matching methods for stereo digital image correlation [J]. *Measurement*, 2021, 173: 108635.
- [13] MATAS J, GALAMBOS C, KITTLER J. Robust detection of lines using the progressive probabilistic Hough transform[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2000, 78(1): 119-137.
- [14] 李雪山, 陈富林. 改进概率 Hough 变换在温度传感器焊接工艺中的应用[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(7): 157-160.
- LI X S, CHEN F L. Application of improved probability Hough transform in welding process of temperature sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2022, 41(7): 157-160. (in Chinese)
- [15] CHUTATAPE O, GUO L. A modified Hough transform for line detection and its performance [J]. *Pattern Recognition*, 1999, 32(2): 181-192.
- [16] 陈珂, 吴建平, 李金祥, 等. 一维概率 Hough 变换的实时鲁棒多圆检测方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(10): 1832-1841.
- CHEN K, WU J P, LI J X, *et al.* Robust real-time multi-circle detection algorithm based on 1D probabilistic Hough transform[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2015, 27(10): 1832-1841. (in Chinese)
- [17] 刁燕, 吴晨柯, 罗华, 等. 基于改进的概率 Hough 变换的直线检测优化算法[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815016.
- DIAO Y, WU C K, LUO H, *et al.* Optimization algorithm of line detection based on improved probabilistic Hough transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815016. (in Chinese)
- [18] GHOSAL S, MEHROTRA R. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection[J]. *Pattern Recognition*, 1993, 26(2): 295-306.
- [19] 文涛, 左东广, 李站良, 等. 基于改进小波变换和 Zernike 矩的亚像素边缘检测算法[J]. 电光与控制, 2015, 22(9): 50-54.
- WEN T, ZUO D G, LI Z L, *et al.* Sub-pixel edge detection algorithm based on improved wavelet transform and zernike moments[J]. *Electronics Optics & Control*, 2015, 22(9): 50-54. (in Chinese)
- [20] HUANG C, JIN W, XU Q, *et al.* Sub-pixel edge detection algorithm based on canny-zernike moment method[J]. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2020, 29(15): 2050238.
- [21] 龚循强, 刘国祥, 李志林, 等. 总体最小二乘拟合问题求解方法的比较研究[J]. 测绘科学, 2014, 39(9): 29-33.
- GONG X Q, LIU G X, LI Z L, *et al.* Compari-

son between solutions of Total Least Squares fitting problem [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(9): 29-33. (in Chinese)

[22] LI B, ZHANG J, YANG R, *et al.* FM-net: deep

learning network for the fundamental matrix estimation from biplanar radiographs[J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2022, 220: 106782.

#### 作者简介:



张 浩(1997—),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要从事机器视觉方向的研究。E-mail: 3188656979@qq.com

#### 通讯作者:



许四祥(1974—),男,湖北汉川人,博士,教授,2007年于华中科技大学获得博士学位,主要从事机器人与机器视觉方向的研究。E-mail: xsx-hust@ahut.edu.cn