

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314718

基于双目立体视觉的连铸辊尺寸三维测量方法^{*}

成彬¹ 冯勇平¹ 雷华²

(1.西安建筑科技大学机电工程学院 西安 710055; 2.中国重型机械研究院股份公司 西安 710016)

摘要:针对连铸车间中,扇形段连铸辊尺寸人工测量效率低下的问题,提出了一种基于双目视觉系统的连铸辊尺寸测量方法。首先,对双目相机采集的图像进行预处理并采用 Otsu 法分割工件前后背景;接着,针对边缘检测精度不高的问题,将传统 Canny 边缘检测算法的梯度模板增加到 8 个以提取工件轮廓,结合多项式插值公式提取亚像素级别特征点;然后,在 SAD 与 Census 变换融合的立体匹配基础上引入 RANSAC 算法来消除错误匹配;最后,采用三角测量原理计算出零件的尺寸。实验结果表明,系统测量的平均相对误差为 0.14%,测量方法具有较高的精度,其稳定性与精确性满足连铸辊的尺寸自动检测任务。

关键词: 双目视觉;亚像素;SAD 与 Census 变换融合;RANSAC;三维测量

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

3D measurement method for continuous casting roll size based on binocular stereo vision

Cheng Bin¹ Feng Yongping¹ Lei Hua²(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. China Heavy Machinery Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: Aiming at the problem of low manual measurement of the size of continuous casting rolls in the sector section in the continuous casting workshop, a continuous casting roll size measurement method based on binocular vision system is proposed. Firstly, the images collected by the binocular camera are preprocessed and the Otsu method was used to segment the background before and after the workpiece; And then, in view of the problem of low edge detection accuracy, the gradient templates of the traditional Canny edge detection algorithm are increased to 8 to extract the workpiece contour, and the sub-pixel level feature points are extracted by combining the polynomial interpolation formula. Then, based on the stereo matching of SAD and Census transformation fusion, the RANSAC algorithm was introduced to eliminate false matching. Finally, the triangulation principle is used to calculate the dimensions of the part. The experimental results show that the average relative error of the system measurement is 0.14%, and the measurement method has high accuracy, and its stability and accuracy meet the task of automatic dimensional detection of continuous casting rolls.

Keywords: binocular vision; subpixel; SAD with Census transformation fusion; RANSAC; 3D measurement

0 引言

连铸是冶金流程不可或缺的一环,同时也是炼钢厂的重要组成部分。而扇形段是连铸机关键设备之一,扇形段在受到恶劣生产工况影响,加之长期运行,会导致支撑框架沉降、连铸辊面磨损等情况出现,需及时对扇形段下线检修,而测量连铸辊直径就是其中一环。目前连铸辊直径主要为人工测量,存在依赖人力且效率低下等缺点。随着工

业的发展,对生产制造过程中的自动化要求越来越高,传统的人工方法已不能满足现代工业自动化的需求。因此,基于视觉测量的方式开始应用到工业生产当中。

双目立体视觉是模拟人的视觉系统来构建现实世界。通过二维图像来获取深度,具有实现简单、成本低廉、可在非接触条件下测距等优点^[1],而立体匹配作为三维重建、非接触测距等技术的关键,是双目视觉的核心内容之一^[2]。张顺岚等^[3]搭建了一套基于双目视觉的三维尺寸测量系

收稿日期:2023-10-09

^{*} 基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JM-360)资助

统,通过将计算得到的三维点云投射到二维平面上,采用最小外接矩形来测量物体尺寸。该方法测量精度较好,但对于非矩形工件测量精度差。李焯等^[4]利用灰度对比增强的两步目标分割方法,对双目视觉获取到的两幅图像进行目标提取,拟合出物体的轮廓中心进行立体匹配,最后得到目标的位置信息。但该方法只能获取目标三维位置信息,无法得到目标的尺寸信息。宋超群等^[5]采用改进加速段测试得出的特征点(features from accelerated segment test, FAST)和二进制鲁棒独立特征描述(binary robust independent elementary features, BRIEF)的双目视觉测量方法对连铸板坯模型进行测量,相比与传统的算法在精度和效率上都有较大的提升,但算法只能对角点明显的工件进行测量。章家威等^[6]采用多组双目摄像机对管道测量截面上投影的多个激光标记进行图像采集、三维重建和坐标融合,通过椭圆拟合得到外管径、椭圆度等尺寸参数,但是该方法需要提前对管道进行激光标记,提高了系统的复杂性。杨宇等^[7]采用基于方向性快速的特征点检测和旋转二进制鲁棒独立特征描述(oriented FAST and rotated BRIEF, ORB)的双目视觉测量方法,对特征点邻域像素点的灰度值加权,优化特征点主方向的提取算法并使用字符串描述子代替传统二进制描述子,提高了匹配精度,但计算量较大,实时性较差。李忠国等^[8]提出一种基于改进的 Census 匹配算法,将变换窗口的中心像素替换成周围像素的平均值进行匹配代价计算,减少原算法对于中心像素的依赖。化春键等^[9]在立体匹配的基础上采用极线约束与基于汉明距离的特征匹配方法初步删除误匹配点,并通过基于 k 维树的近邻点顺序一致性约束方法筛选出正确匹配点对,使用迭代预检验方法来提高随机抽样一致(random sample consensus, RANSAC)的匹配速度。

针对目前测量方法存在的问题,提出一种基于双目视觉的连铸辊尺寸三维测量方法,将传统的 Canny 算法的方向模板改进为 8 个 3×3 邻域的方向模板,使模板表示的方向尽可能为图像的实际边缘方向,其次通过插值亚像素计算公式提取亚像素轮廓特征点。针对在实际测量过程中,存在误匹配的情况,通过在绝对误差和算法(sum of absolute differences, SAD)与 Census 变换融合的灰度匹配基础上引入 RANSAC 算法来消除误匹配和提高匹配效率,并利用三角测量原理计算出连铸辊的三维尺寸。搭建实验系统对本文所述测量方法进行验证,实验表明,该方法减少了立体匹配过后存在的误匹配点对,提高了检测效率和精度,为后续的生产活动提供了一定的参考价值。

1 双目视觉测量系统

1.1 三角测量原理

物体在感光元件上成像时丢失了其在空间的深度信息,双目视觉能够依靠视差原理恢复物体的深度信息^[10],从而实现物体的定位与测量。双目视觉的基本原理是基于

视差原理,利用空间一点左、右图像像素坐标值的差值,通过三角测量原理计算特征点的空间坐标,如图 1 所示。

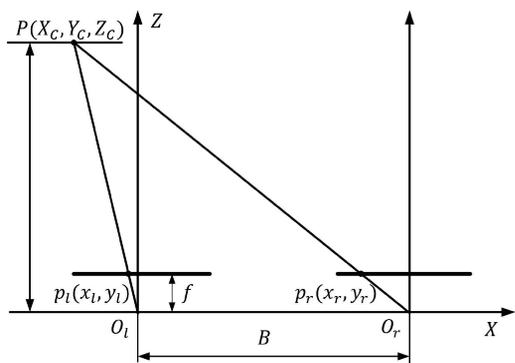


图 1 三角测量原理

设空间中存在一点 $P(X_c, Y_c, Z_c)$, 空间点在左右图像中的像素坐标为 (x_l, y_l) 、 (x_r, y_r) , 基线 B 为左右相机的坐标系原点 O_l, O_r 的距离, 由相似三角形几何关系可知:

$$\begin{cases} x_l = f \frac{X_c}{Z_c} \\ x_r = f \frac{X_c - B}{Z_c} \\ y = y_l = y_r = f \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases} \quad (1)$$

则 P 点的三维坐标为:

$$\begin{cases} X_c = \frac{B \cdot x_l}{B} \\ Y_c = \frac{B \cdot y_l}{D} \\ Z_c = \frac{B \cdot f}{D} \end{cases} \quad (2)$$

式中: D 为被观测点的视差, 表示为:

$$D = x_l - x_r \quad (3)$$

因此, 由式(3)可知, 只要知道相机的内参和视差, 即可求出空间中一点 P 的三维坐标。

1.2 双目相机系统

以左相机为基准, 双目相机成像会涉及以下 4 种坐标系, 世界坐标系 $O_c(X_c, Y_c, Z_c)$ 、相机坐标系 $O_l(X_l, Y_l, Z_l)$ 、图像坐标系 $O'(X', Y')$ 和像素坐标系 $O_p(x_l, y_l)$ 。如图 2 所示, 世界坐标系 $O_c(X_c, Y_c, Z_c)$ 通过一系列矩阵变换得到像素坐标系 $O_p(x_l, y_l)$ 。

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_l \mathbf{M}_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

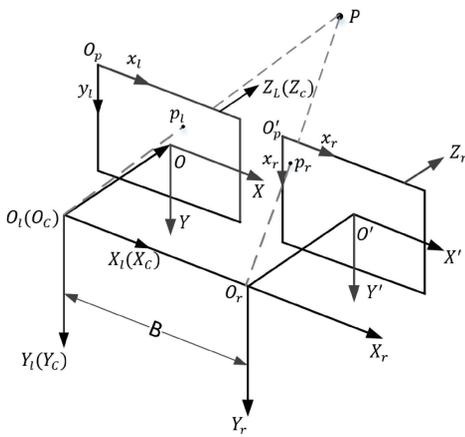


图 2 双目视觉成像模型

式(4)中: \mathbf{M} 为 3×4 的投影矩阵; f_x, f_y, u_0, v_0 为相机的内部参数,故 \mathbf{M}_1 为相机内参数矩阵,由焦距、扭曲因子、主点位置组成; \mathbf{M}_2 为相机外参数矩阵,由旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{T} 组成。

对于双目相机的内外参,通常采用双目相机标定来获得,相机标定后就能确定相机坐标系、图像坐标系和像素坐标系之间的关系,同时也能对图像进行立体矫正和畸变矫正。本文采用基于棋盘的相机标定方法,并利用 Matlab 标定工具箱完成双目相机的标定^[11]。

1.3 双目视觉测量流程

针对扇形段连铸辊尺寸参数的测量问题,提出了如图 3 所示的测量流程。主要包括相机标定、图像矫正和预处理、改进的 Canny 边缘检测及亚像素特征点提取、SAD 与 Census 变化融合的灰度匹配和 RANSAC 优化等步骤。

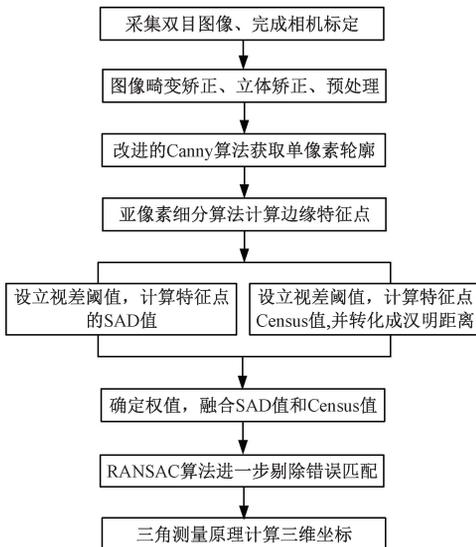


图 3 双目视觉测量系统流程图

2 改进的 Canny 边缘检测及亚像素点提取

双目视觉测量系统用于测量具有明显几何特征的工

件,例如工件棱线的交点和圆孔的中心,以及工件的边缘轮廓。对于连铸辊图像角点不明显的特点,其边缘轮廓包含了丰富的工件特征信息,代表了工件的基本几何形状。故本文采用对工件的边缘轮廓特征点进行匹配获取工件的三维信息。

首先,采用最大类间方差法(Otsu法)对图像进行前后背景分离,作为一种自适应阈值进行前后背景分割的方法,Otsu算法采用基于全局的二值化算法来进行计算,根据图像的灰度特性,通过最大类间方差的衡量标准,将图像中的目标与背景分离。分离出目标工件之后,为提高检测精度,对目标提取亚像素轮廓。

传统的 Canny 算法在计算图像梯度时仅考虑水平方向和垂直方向,所代表的方向太少,且只表示灰度的变化方向,没有考虑图像的实际边缘,因此可能导致计算结果有较大的误差。为了提高检测精度,本文需采用亚像素细分算法对目标轮廓求亚像素级别的特征点,故在考虑图像实际边缘方向和检测效率的情况下,将 Canny 算法的方向模板改进为 8 个 3×3 邻域的方向模板,使模板表示的方向尽可能为图像的实际边缘方向,如图 4 所示。将这 8 个模板分别与获取到的图像特征点逐点进行计算,将每一点计算过后的最大值作为该点的梯度值,并且将最大值对应的模板方向顺时针旋转 90° 作为该点的梯度方向计算亚像素坐标。

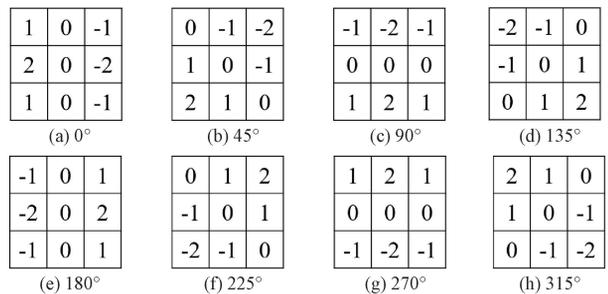


图 4 方向模板

得到图像中每个点的梯度幅值和对应的梯度方向后,通过在每个梯度方向上选一点和这点相邻两点共 3 个点,对比这 3 点的梯度幅值,如果这一点同时大于相邻两点的梯度幅值,那么这一点就为图像的边缘点,此步骤为非极大值抑制。再通过双阈值算法检测和连接边缘之后便得到目标工件的单像素边缘轮廓。

其次,用边缘点的梯度方向近似替代未知的亚像素点的梯度方向,并在此方向上进行插值,带入点的亚像素细分算法的计算式(5)便可得到边缘点的亚像素位置^[12]。

$$\begin{cases} X_c = x + \frac{R_{-1} - R_1}{R_{-1} - 2R_0 + R_1} \cdot \frac{W}{2} \cos(\theta) \\ Y_c = y + \frac{R_{-1} - R_1}{R_{-1} - 2R_0 + R_1} \cdot \frac{W}{2} \sin(\theta) \end{cases} \quad (5)$$

其中, R_0 为边缘点 $P_0(x, y)$ 的梯度幅值; R_{-1}, R_1 分别是在梯度方向上与 P_0 点相邻的两像素点 P_{-1}, P_1 的梯度

幅值; W 为相邻像素点到边缘点的距离(梯度方向为 0° 、 90° 、 180° 和 270° 时距离等于 1, 其他角度时距离为 $\sqrt{2}$); θ 为梯度方向与 X 轴正向夹角。

通过上述过程即可提取亚像素级别的轮廓特征点。在此基础上, 进行双目视觉的立体匹配。

3 基于轮廓特征点的立体匹配及优化

3.1 SAD 与 Census 变换融合的立体匹配

1) 极线约束

根据标定后获取的双目相机摄像机内外参数使左、右两幅图像平面进行变换以达到同行共面的效果, 也能消除平行双目视觉系统在制造安装时两相机无法完全平行的缺陷, 此步骤为立体矫正, 如图 5 所示。立体矫正过后, 两张图像上特征点的 y 坐标理论上一致, 此时只需要沿图像的 x 方向一维搜索匹配点, 称为极线约束。

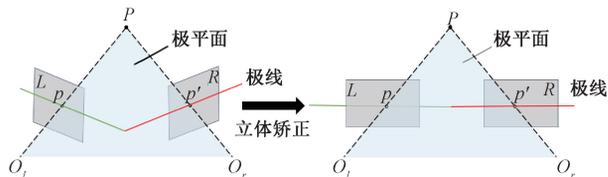


图 5 立体矫正

极线约束只是实现了特征点对在极线方向上的约束, 同时在实际情况中, 立体矫正存在误差, 导致匹配点对 y 坐标无法真正对齐, 所以需要在极线上下几个像素的区域上搜索匹配点。这就导致左图像的特征点在极线约束的情况下还存在多个候选点。

2) SAD 与 Census 变换算法

本文采用灰度相关的特征点匹配方法, 在候选点中筛选出最佳匹配点, 以此来达到立体匹配的目的。

对于采用灰度相关的特征点匹配方法, $SAD^{[13]}$ 是一种基于局部区域的立体匹配算法, 在特征点周围定义:

$$SAD(x, y, d) = \sum_{i, j \in W} |F_l(x+i, y+j) - F_r(x+i+d, y+j)| \quad (6)$$

式中: $F_l(x+i, y+i)$ 、 $F_r(x+i+d, y+j)$ 表示左右图像特征点的灰度值; (x, y) 为特征点像素坐标; d 为水平视差; W 表示以特征点为中心的匹配窗口。

SAD 相比于其他算法的优势在于匹配速度和质量方面, 但其匹配结果易受光照影响。

Census 变换^[14] 使用像素领域内的局部灰度差异将像素灰度转化为比特串。通过选取邻域窗口(窗口大小为 $n \times m$, n 和 m 都为奇数)中心像素为参考像素, 将邻域窗口中的每个像素灰度值与中心像素灰度值进行比较, 灰度值小于或等于中心像素灰度值的像素记为 0, 否则记为 1, 将得到的布尔值映射到一个比特串中得到 Census 变换值。其表达式如下:

$$C(p, q) = \begin{cases} 0, & f(p) \leq f(q) \\ 1, & f(p) > f(q) \end{cases} \quad (7)$$

Census 变换的优点在于对光照变化不敏感, 且能够容忍一定的噪声, 但其对弱纹理区域和重复场景匹配效果不好^[15]。

3) SAD 与 Census 变换融合

根据连铸辊的测量实际工况, 为了提高匹配的效率和鲁棒性, 现将上述两种算法进行加权融合。

具体实现方法: 以左视图为基准图像, 将特征点映射到对应的灰度图中, 选择一特征点为中心像素建立一个大小为 $n \times m$ 的矩形窗口。以右视图为匹配图像, 沿着校正后的极线上下 3 个像素宽度进行搜索, 得到候选匹配点。进一步采用将 SAD 算法和 Census 变换通过加权相加融合作为特征点的灰度相似性度量标准, 以此来选取最佳匹配点, 根据实时性和光照变换不均匀等实际情况选择不同的 α 值来确定其权重, 其表达式为:

$$SC(x, y, d) = \alpha \sum_{i, j \in W} SAD(x+i, y+j, d) + (1-\alpha) \sum_{i, j \in W} C(x+i, y+j, d) \quad (8)$$

因 SAD 计算出的结果为整数, 而 Census 计算后的值为 0 和 1 的字符串, 故需要计算左右匹配点窗口 Census 值的汉明距离, 如图 6 所示。两值分别乘以不同的权值后相加, 所得结果值最小的候选点为最佳匹配点, 此时的视差为所求最佳视差。

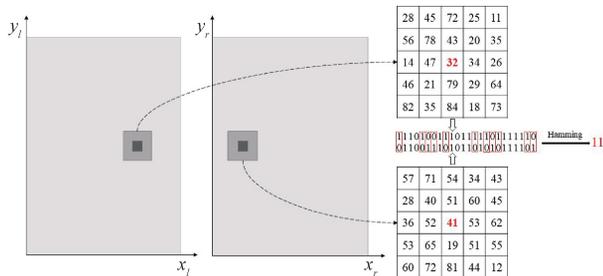


图 6 汉明距离示意图

特征点经过 SAD 与 Census 变换融合的匹配后, 为了增加匹配精度, 一般还需要通过左右一致性检验步骤, 具体方法是以左图特征点为基准选取右图特征点中的某个最佳匹配点, 则左图特征点中应有一个点与之相对应, 否则该特征点为误匹配点, 从而初步去除错误匹配点对。

3.2 基于 RANSAC 算法的离群点对去除

当采用灰度相关的特征点匹配方法对特征点进行匹配, 相邻点邻域窗口内的像素值近似时会产生“离群点对”的情况, 此时便需要通过相应的算法来去除这些错误匹配, 以此来提高检测的精度, 本文在 SAD 与 Census 变换融合的匹配基础上引入 RANSAC 算法^[16] 和视差范围约束来去除虚假匹配。

1) RANSAC 去除误匹配。在双目相机获取的两幅图像中, 如果左图 **A** 和右图 **B** 符合同一个透视变换^[17], 则存

在一个 3×3 的单应性矩阵 \mathbf{H} , 使得 $\mathbf{B} = \mathbf{A} * \mathbf{H}$ 。单应性是一个平面到另一个平面的投影映射; 假设 \mathbf{A} 中的轮廓特征点像素坐标为 (x, y) , 右图 \mathbf{B} 中的轮廓特征点像素坐标为 (x', y') , 则透视变换可以用如下公式表示:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

上式具有尺度不变性, 即 \mathbf{H} 可以乘以任意非零常数, \mathbf{H} 乘以 $1/h_9$, 则 \mathbf{H} 可以重新写成:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

此时, 式(9)可变换为:

$$\begin{cases} x'h_1 + y'h_2 + h_3 - x'xh_7 - y'xh_8 = x \\ x'h_4 + y'h_5 + h_6 - x'yh_7 - y'yh_8 = y \end{cases} \quad (11)$$

理想情况下, 左图中轮廓特征点到右图对应的匹配点应该经过同一个透视变化, 即满足唯一的单应性矩阵, 但是在实际情况中, 受到各种因素的影响, 导致不是所有匹配点都是正确匹配, 即存在不同的单应性矩阵, 此时便需要计算单应性的质量, 以此来确定最优单应性矩阵。

采用 RANSAC 算法来确定最优单应性矩阵。其中心思想是用尽可能少的点通过迭代的方式来优化单应性矩阵, 确定最优矩阵, 最大程度扩大模型参数的影响范围。在 RANSAC 算法中, 由 a 个特征点组成的特征空间 P , 最少需要 n 个点可以拟合出图像匹配模型的参数, 拟合该参数的步骤如下:

(1) 选取参数放置信度 ρ 、判定阈值 η 、设定初始“内点”比例参数 $\omega = 1$, 迭代次数 $k = 0$, 总迭代次数为 $K = 200$;

(2) 随机在数据集中抽取一些样本 $n = 4$;

(3) 根据式(11)估计一个模型 \mathbf{M}_i , 这里的模型就是单应性矩阵 \mathbf{H} ;

(4) 对特征空间 P 中的其他特征点, 计算每个点与模型 M 的欧式距离, 当距离大于阈值时特征点为外点(outliers), 反之为内点(inliers), 并记录所有内点的值 m ;

(5) 继续迭代, 由式(12)计算并更新总迭代次数 K , 当迭代次数达到 K 值时, 选择单应性质量最好及 m 值最多的模型 M 作为最优单应性矩阵。

$$K = \frac{\log(1-\rho)}{\log(1-\omega^n)} \quad (12)$$

2) 引入视差范围约束^[18]。视差范围约束方法基于双目视觉成像原理, 即视差的大小直接由物体与相机的距离决定。通过确定双目视觉系统的工作距离 $[L_1, L_2]$, 便可以根据摄像机标定参数和成像模型计算出对应的视差范围 $[d_1, d_2]$ 。引入视差范围约束后, 双目视觉系统的搜索范围从整幅图像缩小到 $[d_1, d_2]$, 如图 7 所示, 该约束不仅能够减少算法的误匹配率, 也能提高其匹配效率。

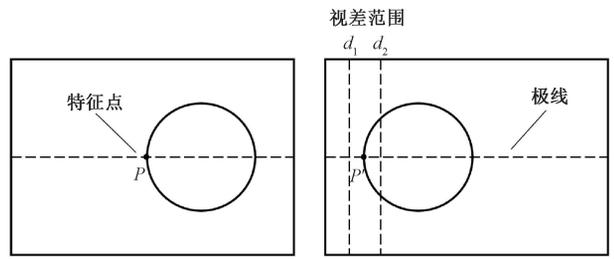


图 7 视差范围约束

4 实验结果及数据分析

4.1 实验具体过程

实验室搭建双目视觉测量系统模拟测量连铸辊直径, 使用一台型号为 HBVCAM 双目相机, 通过 USB2.0 数据线 与计算机相连进行供电和数据传输, 以 4 种不同直径的圆柱形工件为测量对象, 如图 8 所示。算法以 Python 为编程语言, 采用 PyCharm 配置的 OpenCV 库为编程环境, 从而完成双目立体视觉系统的搭建。

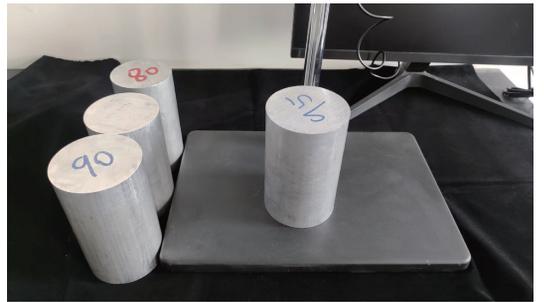


图 8 圆柱形测量工件

1) 完成双目视觉测量平台的搭建, 进行双目相机标定。采用 $135 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 的棋盘格标定板进行实验, 左右相机共采集了 18 对标定图像, 采用 Zhang 提出的 2D 平面棋盘格标定法, 利用 Matlab 完成标定。标定结果的总平均像素误差为 0.18 pixel, 最大平均像素误差为 0.24 pixel, 如图 9 所示。双目系统标定的内外参数, 如表 1 所示。

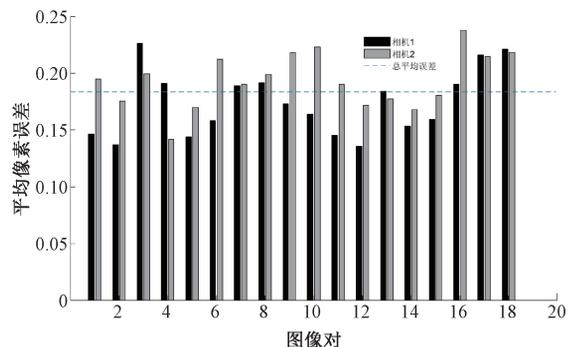


图 9 双目相机标定误差

2) 图像预处理及立体矫正。对获取到的双目图像进行中值滤波操作, 滤波采用 3×3 模板, 使其在尽量保留图

表 1 双目系统内参数标定结果

	左相机	右相机
相机内参数	$\begin{bmatrix} 1 & 047.13 & 0 & 617.63 \\ 0 & 1 & 048.32 & 506.13 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 041.82 & 0 & 622.16 \\ 0 & 1 & 043.4 & 496.18 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$
相机畸变参数	$(-0.053\ 8, 0.201\ 1, -0.000\ 034, 0.000\ 284, -0.210\ 8)$	$(-0.061\ 5, 0.263\ 9, 0.000\ 023, -0.000\ 32, -0.337\ 0)$
旋转矩阵 R	$\begin{bmatrix} 1.000\ 0 & -0.001\ 1 & -0.001\ 0 \\ 0.001\ 1 & 1.000\ 0 & 0.000\ 3 \\ 0.001\ 0 & -0.000\ 3 & -1.000\ 0 \end{bmatrix}$	
平移矩阵 T	$[-59.673\ 9\ 0.097\ 2\ -0.310\ 9]^T$	

像细节特征的前提下对目标图像的噪声进行抑制,再根据标定得到的相机畸变参数对获取的图像进行畸变矫正,最后通过双目相机内参数和外参(位姿关系)使左、右 2 幅图像平面原点坐标相同,左、右投影面共面和行对齐,即立体矫正,如图 10 所示。

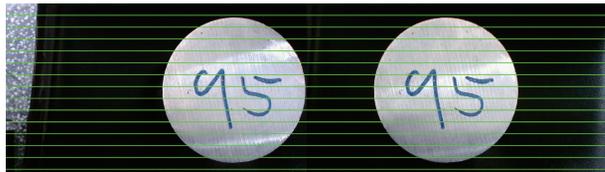


图 10 立体矫正

3)对预处理和矫正后的图片进行亚像素轮廓级别的边缘特征点提取。首先,对图像进行预处理,尽可能抑制图像噪声。其次,通过 Otsu 自动阈值法将目标从背景中分离,再采用改进的 Canny 边缘检测算法获取工件 8 个方向的梯度图,如图 11 所示,并通过非极大值抑制得到单像素轮廓,最后结合亚像素细分算法计算公式获取亚像素特征点,如图 12 所示。可以看出,相对于普通像素点,亚像素特征点描述目标轮廓更加精确。

4)SAD 与 Census 变换融合的立体匹配。对左右图像提取的亚像素级轮廓特征点施加极线约束,使其在匹配时沿极线上下几个像素的区域上搜索匹配点。将 SAD 和 Census 变换进行加权融合作为匹配点对的灰度相似性度量标准,取权值 $\alpha = 0.6$ 带入式(8)计算最佳匹配点,再采用左右一致性检验初步提高匹配的准确率,如图 13 所示,此结果中存在错误匹配点对,需要进一步对结果进行优化。

5)RANSAC 算法去除误匹配。对于立体匹配之后存在误匹配的情况,采用 RANSAC 算法计算左右匹配点的最优单应性矩阵,取距离阈值 $\eta = 3$ 去除立体匹配过程中产生的误匹配以此来优化立体匹配结果,再加入视差约束提高匹配速率,优化结果如图 14 所示。为更加直观的显示优化结果,将工件的亚像素轮廓特征点立体匹配优化前后的结果进行对比,如图 15 所示,可以看出 RANSAC 算

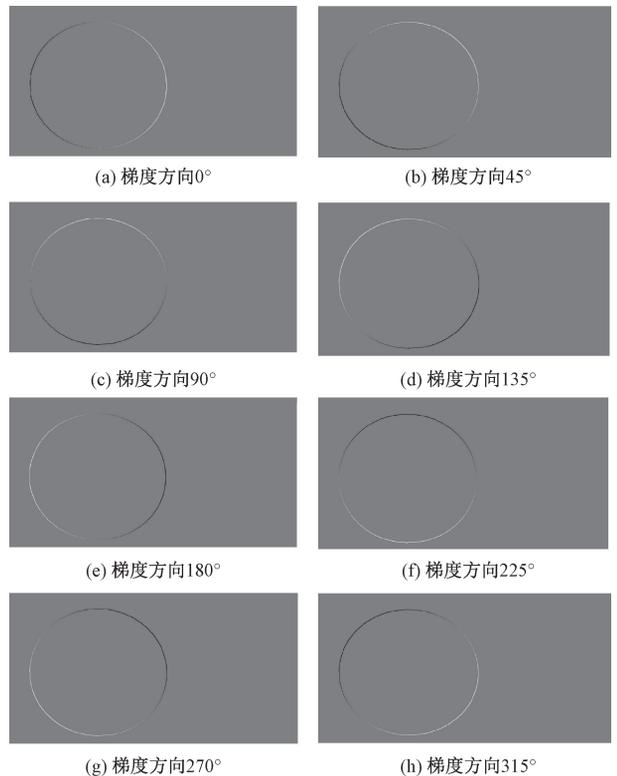


图 11 8 模板梯度图

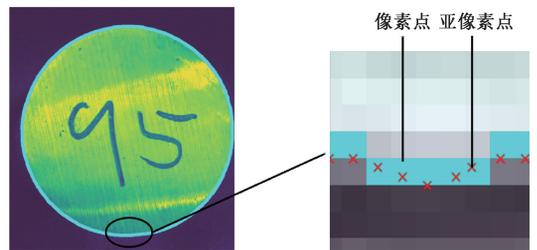


图 12 亚像素特征点提取

法去除了立体匹配后不符合最佳单应性矩阵的匹配点对。

6)计算匹配点对的视差信息,通过三角测量原理式(2)计算轮廓特征点的三维坐标,对 4 种不同直径的零件轮廓特征三维信息进行空间圆拟合处理,可得到圆柱形

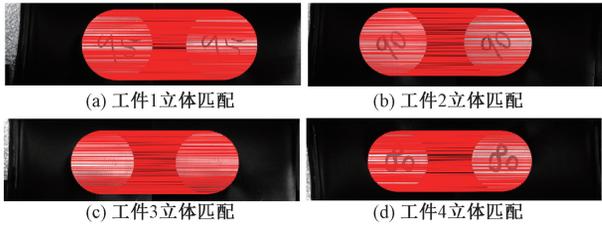


图 13 SAD 和 Census 变换加权融合的立体匹配

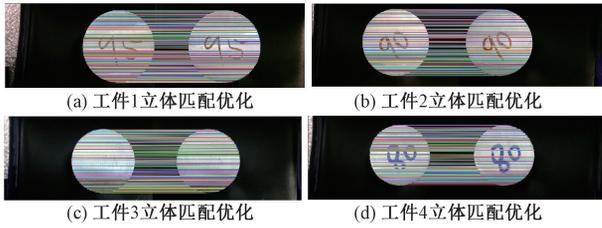
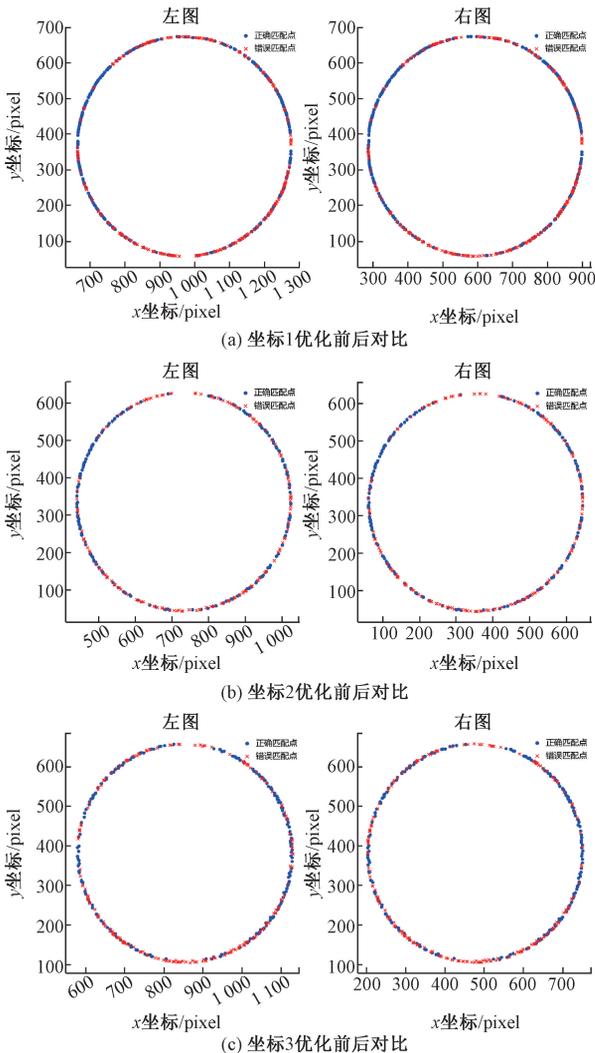
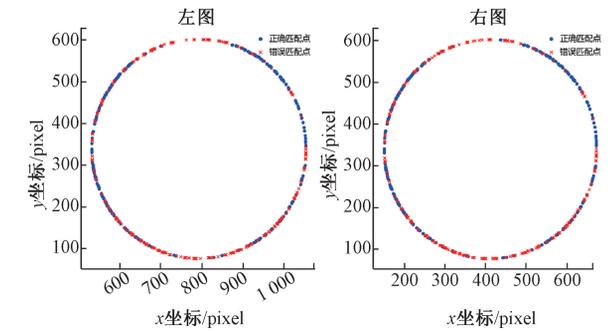


图 14 RANSAC 算法去除误匹配



(d) 坐标4优化前后对比

图 15 误匹配与正确匹配点对



工件拟合图,如图 16 所示。通过对不同尺寸零件进行重复测量,结果如表 2 所示。

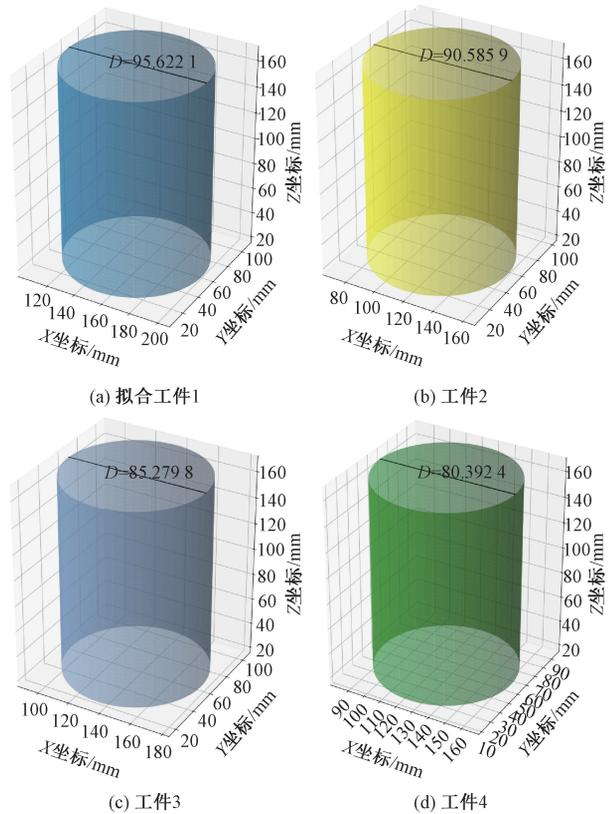


图 16 拟合工件尺寸

4.2 实验结论分析

为了分析测量的可重复性,实验对 4 种实际直径分别为 95.48、90.59、85.47 和 80.53 mm 的连铸辊模型进行重复测量实验,将所得测量结果的相对误差进行统计,如图 17 所示。

从结果中可以看出,该双目测量系统的测量精度较高,重复性误差较小,对于零件尺寸的测量相对误差均在 0.29% 以内,平均相对误差为 0.14%,且测量结果较稳定,相对误差大都保持在 0.22%~0.06% 之间。相对于传统

表 2 工件直径尺寸测量结果

工件	参考值/ mm	测量值/ mm	误差值/ mm	相对 误差/%
工件 1	95.48	95.69	-0.21	0.22
		95.50	-0.02	0.02
		95.64	-0.16	0.16
		95.62	-0.14	0.15
		95.37	0.11	0.12
工件 2	90.59	90.65	-0.06	0.07
		90.37	0.22	0.24
		90.75	-0.16	0.17
		90.46	0.13	0.14
		90.58	0.01	0.01
工件 3	85.47	85.55	-0.08	0.09
		85.32	0.15	0.17
		85.35	0.12	0.14
		85.44	0.03	0.04
		85.31	0.16	0.19
工件 4	80.53	80.41	0.12	0.15
		80.48	0.05	0.06
		80.39	0.14	0.17
		80.43	0.10	0.12
		80.29	0.24	0.29

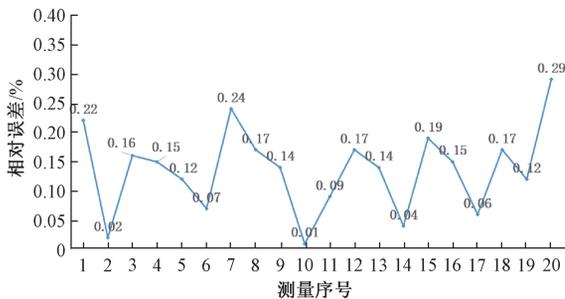


图 17 测量结果相对误差

人工测量连铸辊直径的方法,在测量效率方面,本文研究方法能够更好的满足工业生产的测量要求。

5 结 论

针对连铸车间中,扇形段连铸辊尺寸人工测量效率低下的问题,本文在实验室搭建双目测量系统对连铸辊进行测量,提出了一种基于双目立体视觉的连铸辊尺寸三维测量方法。首先,将传统的 Canny 算法在梯度计算时的方向模板进行改进,使模板表示的方向尽可能的为图像的实际边缘方向,再结合插值亚像素细分算法公式提取亚像素轮廓特征点。其次,在 SAD 与 Census 变换融合的灰度匹配基础上引入 RANSAC 算法来减少立体匹配过后存在的误匹配点对,最终完成工件的尺寸拟合与测量。实验表明该

方法能较好地解决连铸辊角点不明显导致双目视觉定位与测量精度问题,降低了误匹配点对的数量,提高了检测的精度和效率,为后续的工业生产提供一定的参考价值。

实验采用 SAD 与 Census 变换融合的立体匹配算法,在确定其权重系数时经过多次测量选择最优权重系数,并未选择智能算法来确定。因此后续的研究可通过相关优化算法自动确定其权重系数,从而进一步提高算法的测量效率和精度。

参考文献

- [1] SU C, TAN G, LUO Y. Research on stereo matching technology based on binocular vision[J]. Open Access Library Journal, 2019, 6(9): 1-10.
- [2] YIN Z, XIONG J. Stereovision measurement of layer geometry in wire and arc additive manufacturing with various stereo matching algorithms[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 428-438.
- [3] 张顺岚,唐望平,莫建文.改进的双目视觉三维尺寸测量系统[J].电视技术,2015,39(7):127-132.
- [4] 李焯,张铭钧.水下双目视觉系统中的目标分割和目标定位[J].华中科技大学学报(自然科学版),2017,45(12):53-59.
- [5] 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):173-180.
- [6] 章家威,李昊冉,罗天慧,等.融合多组双目视觉系统的管道尺寸测量技术研究[J].电子测量技术,2023,46(6):137-146.
- [7] 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.
- [8] 李忠国,吴昊宸,陆军,等.双目视觉立体匹配算法的改进[J].机械设计与研究,2022,38(3):27-29,36.
- [9] 化春键,潘瑞,陈莹.基于改进 ORB-RANSAC 的双目测距方法[J].激光与光电子学进展,2021,58(22):366-373.
- [10] 方建中,许四祥,杨宇,等.基于边缘拟合的双目视觉定位与测量方法[J].光学技术,2019,45(4):412-417.
- [11] 刘昶,姜楠.基于双目视觉的棒材端面中心点定位[J].电子测量技术,2023,46(14):174-181.
- [12] 都胡平,刘光宇,薛安克.基于机器视觉的光伏电池位置检测方法[J].工业控制计算机,2019,32(9):19-20,23.
- [13] ZHONG Y, LONG C, BYEON W, et al. Displacement-invariant cost computation for efficient stereo matching[J]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2020, 14(8): 1-8.
- [14] 方春华,陆杰炜,董晓虎,等.基于 AD-Census 代价及目标检测的吊车防碰线技术[J].电子测量技术,2022,

- 45(13):141-145.
- [15] 原培新,蔡烜,曹文伟,等.基于双目立体视觉的列车目标识别和测距技术[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(3):335-343.
- [16] HOSSIN NEJAD Z, NASRI M. An adaptive image registration method based on SIFT features and RANSAC transform [J]. Computers and Electrical Engineering, 2017, 62: 524-537.
- [17] 苏玺霖,樊春玲,张春堂.基于机器视觉的爬管机器人路径信息识别算法[J].电子测量技术,2022,45(22):92-98.
- [18] 翟敬梅,黄锦洲,刘坤.双目视觉下基于边缘特征的机

器人作业环境检测方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2018,46(3):1-7.

作者简介

成彬,博士,教授,主要研究方向为机器视觉与数字孪生技术。

E-mail:cheengbin@163.com

冯勇平(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为机器视觉。

E-mail:1620540730@qq.com

雷华,高级工程师,主要研究方向为冶金设备研究及设计。

E-mail:leihua2005@163.com