

大尺寸圆形零部件尺寸高精度视觉测量方法<sup>\*</sup>巢 渊<sup>1,2,3</sup> 曹 震<sup>1</sup> 杜帅帅<sup>1</sup> 张 敏<sup>3</sup>

(1. 江苏理工学院机械工程学院 常州 213001; 2. 河海大学信息科学与工程学院 常州 213022;

3. 常州祥明智能动力股份有限公司 常州 213011)

**摘 要:** 圆环类零部件,在进行环形光源和条形光源照射方式下的圆环直径尺寸测量时,通常存在零部件倒角特征成像出现宽边缘、受厚度影响导致圆环边界呈现阴影、表面纹理及擦痕影响图像处理效率、相机视野不足无法单次采集大尺寸圆形零部件高分辨率全景图像等问题。本文提出一种基于改进 SURF 图像拼接的圆形零部件尺寸测量方法,通过光照优化、图像拼接和亚像素边缘检测实现零部件尺寸的高精度测量。首先,分别提出条形光源 45°布置、环形光源垂直向下和条形光源 45°组合布置的照射方式,用以消除在零部件成像中存在的宽边缘、阴影、纹理及擦痕等对尺寸测量的影响。其次,改进 SURF 特征匹配法,定位拼接图像重叠区域进行特征点粗匹配。接着,提出 RANSAC 算法对特征点进行精匹配,改进图像配准法,等尺寸扩充零部件拼接图像,补充缺失背景区域。然后,提出加权平均融合算法对拼接图像进行平滑处理,获取高分辨率零部件全景图像。最后,改进最小二乘法拟合圆方法,以实现图像中边缘圆环的拟合,通过像素尺寸转化获取零部件实际尺寸值。实验结果表明,该方法相比传统视觉测量方法精度更高,与三坐标测量仪测量参考值相对误差在 0.044 4% 以内。

**关键词:** 光照优化;SURF 特征提取;图像拼接;圆拟合;视觉测量

**中图分类号:** TP391;TN302 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

## High-precision visual measurement method for large-size circular parts

Chao Yuan<sup>1,2,3</sup> Cao Zhen<sup>1</sup> Du Shuaishuai<sup>1</sup> Zhang Min<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China;

2. College of Information Science and Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

3. Changzhou Xiangming Intelligent Drive System Corporation, Changzhou 213011, China)

**Abstract:** When measuring the diameter of circular parts under the illumination methods of ring light source and strip light source, the problems are usually produced, such as the chamfer features of parts are prone to wide edges in the images, the shadows on the boundaries of circles are appeared due to the influence of thickness, the efficiency of image processing is affected by the surface textures and scratches, and the high-resolution panoramic image of large-sized circular parts is acquired multiple times due to insufficient camera field of view. In this paper, a measurement method for large-size circular parts size based on improved SURF image stitching is proposed, and the high-precision measurement of parts size is realized by illumination optimization, image stitching and sub-pixel edge detection. Firstly, the illumination methods of the strip light source arranged at 45°, the combination of ring light source arranged vertically downward and strip light source arranged at 45° are proposed respectively, thus, the wide edges, shadows, textures and scratches in the images of parts are eliminated, which influence the measurement of parts size. Secondly, the SURF feature matching method is improved to locate overlapping regions of stitching images for coarse matching of feature points. Thirdly, the RANSAC algorithm is proposed for accurate matching of feature points, the image registration method is improved to expand the stitching images of parts to the same size and complement the missing background areas. Fourthly, the weighted average fusion algorithm is proposed to smooth the stitched image, and the high-resolution parts panoramic image is obtained. Finally, the least squares fitting of circles is improved to fit the edge circle in the image, and the actual diameter measurement value of circular parts is obtained through pixel size conversion. The experimental results show that the proposed method is more accurate than the traditional visual measurement method, and the relative error with the CMM measurement reference value is less than 0.044 4%.

**Keywords:** illumination optimization; SURF feature extraction; image stitching; circular fitting; vision measurement

## 0 引 言

圆形特征零部件是生产制造领域常见的设备组成部

分,常见的有齿轮、轴承、固定环等<sup>[1-3]</sup>,圆环直径尺寸是品质检测的重要参数<sup>[4]</sup>,关系到设备的使用性能和状态。随着工业自动化的高速发展,这些零部件精度要求也随之提

升<sup>[5]</sup>,同时圆形零部件的直径尺寸相比传统长轴类零部件的轴径尺寸测量,存在圆心点不易高精度提取的难点,而传统方法通常采用千分尺直接测量,精度较低。因此,研究圆形零部件高精度视觉测量方案具有重要意义。目前对于大尺寸圆形特征的测量,通常有 3D 点云测量和 2D 平面测量两种方式。文献[6]设计了一个基于三维点云拼接的轮廓尺寸测量平台,通过 6 组激光光源和工业相机采集三维点云数据,采用多帧点云配准拼接的方法完成大尺寸钢管圆直径尺寸的测量,该方法精度高,但应用成本和测量难度较高,多用于零部件 3D 尺寸测量。因此,2D 视觉测量方法凭借其精度高,稳定性好,成本较低等优势广泛应用于工业生产。在工业零部件 2D 视觉测量应用中,光照方式对图像特征边缘的精确定位和提取至关重要<sup>[7]</sup>,采用环形光源垂直向下照射的方式,零部件倒角特征成像存在宽边缘,不利于边缘提取<sup>[8]</sup>。采用条形光源角度照射的方式,圆环类零部件内圆环边界受厚度影响成像存在阴影,影响边缘检测<sup>[9]</sup>。因此需要通过光源优化提高零部件成像质量,从而提高尺寸测量精度。尺寸超过 50 mm 的零部件称之为大尺寸零部件<sup>[10]</sup>,在相机视野不足的情况下,无法单次采集高分辨率零部件全景图像<sup>[11]</sup>,需要通过图像拼接技术实现高分辨率零部件全景图像的获取<sup>[12]</sup>,从而进行大尺寸零部件的高精度测量。

图像拼接技术中图像配准的精度直接影响全景图像拼接的精度。图像配准通常分为基于灰度信息、基于变换域和基于特征的图像配准法<sup>[13-15]</sup>。灰度信息配准法易实现,但受光照变化影响,匹配的准确度较低;变换域配准法抗噪性强,适用于缩放、旋转和平移的图像配准中,鲁棒性较低;特征配准法主要通过特征点提取、特征点描述和特征点匹配进行图像配准,这类算法匹配速度快,精度高。因此,基于特征的图像配准法在图像拼接中得到广泛应用。为高效获取无人机平滑全景影像,文献[16]提出一种结合分块尺度不变特征转换(scale invariant feature transform, SIFT)特征点提取和拉普拉斯金字塔融合的无人机图像拼接方法,将原图均匀分块并通过 SIFT 算法对每个子块进行特征提取,采用随机抽样一致性(random sample consensus, RANSAC)算法去除误匹配点,应用拉普拉斯金字塔融合算法拼接图像,该方法匹配效率高,但不适用于零部件图像的高精度拼接。针对大尺寸齿轮测量超出工业相机有效视距的问题,文献[17]提出一种加速稳健特征(speeded up robust feature, SURF)特征点检测与快速视网膜关键点(fast retina keypoint, FREAK)特征描述子相结合的图像拼接算法,图像配准过程中进行刚性变化,采用加权融合法完成齿轮图像无缝拼接,该拼接方法速度快、精度高,但易受零部件相似特征影响拼接精度需进一步提升。为解决图像拼接过程中特征检测耗时长、误匹配率高等问题,文献[18]提出一种基于载物台运动信息的显微图像预测拼接算法,通过载物台移动距离定位图像重叠区域并预测特征

点小目标位置范围,在预测位置进行 SURF 特征点匹配,通过特征点对的斜率进行筛选,采用 RANSAC 算法进行特征精确匹配,使用改进加权平均融合算法完成图像拼接,该拼接算法精度较高,但需要基于高精度的运动信息和位置预测,成本高且缺乏全面性。为解决恶劣环境下综采工作面视频拼接特征提取匹配准确率低的问题,文献[19]提出一种改进加速稳健特征快速最近邻搜索(speeded up robust feature-fast library for approximate nearest neighbors, SURF-FLANN)的视频拼接特征提取与匹配算法,将传统高斯滤波更换为双边滤波提取图像中的 SURF 特征点,同时在特征向量中引入特征点 4-领域内的特征点描述符信息来改进描述算子,采用随机样本共识-快速最近邻搜索(random sample consensus-fast library for approximate nearest neighbors, R-FLANN)特征匹配算法进行特征点匹配,该方法特征提取准确率高匹配速度快,但拼接精度存在一定的提升空间。图像拼接过程中,存在高分辨率图像特征匹配效率低,零部件图像存在大量相似特征易导致特征点误匹配等问题。因此,为高效率获取高精度零部件全景图像,需要对零部件图像拼接算法进行改进,从而实现零部件图像的高精度尺寸测量。

为提高大尺寸圆形零部件尺寸测量精度,本文对零部件图像高精度拼接方法进行改进。为解决环形光源照射下金属固定倒角特征在成像中存在宽边缘,条形光源照射下深沟球轴承受厚度影响导致内圆环边界存在阴影和平面推力轴承片表面纹理及擦痕影响图像处理效率等问题,分别提出条形光源两侧 45°布置、环形光源垂直向下和条形光源两侧 45°布置的组合照射方式,用以消除在零部件成像中存在的宽边缘、阴影、纹理及擦痕等对尺寸测量的影响。针对传统视觉测量过程中相机视野不足无法高精度测量大尺寸圆形零部件的问题,提出基于改进 SURF 特征匹配的零部件高精度拼接方法,获取高分辨率零部件全景图像,实现高精度尺寸测量。本文在拼接过程中,基于重叠区域定位进行特征提取,能够有效提高特征匹配的效率和准确性。改进图像配准方法,等尺寸扩充拼接图像,消除全景图像黑色背景特征,能够有效提高图像检测的准确性。在尺寸测量过程中,改进最小二乘法拟合圆,基于圆心点估计遍历筛选圆特征边缘像素点,能够有效提高圆拟合精度,从而提高尺寸测量精度。通过不同光照下零部件尺寸测量、本文和传统方法下零部件尺寸测量等实验对比与分析,验证本文提出方法的有效性。

## 1 算法原理

在零部件图像高精度拼接过程中,基于特征点匹配的拼接方法凭借其柔性高、抗干扰能力强等优势得到广泛应用,通常包括 SIFT 特征匹配法、SURF 特征匹配法和旋转不变性二进制描述(oriented fast and rotated brief, ORB)特征匹配法等<sup>[20-22]</sup>。选择匹配准确度高,鲁棒性高和稳定性

好的图像拼接算法对零部件图像的高精度拼接至关重要, SURF 算法相比 SIFT 算法计算简单、尺度不变性更好, 相比 ORB 算法精度更高、鲁棒性更强。为解决高分辨率图像特征匹配效率低, 零部件图像存在大量相似特征易导致特征点误匹配等问题, 本文对 SURF 特征匹配算法进行改进。

### 1.1 基于重叠区域定位的改进 SURF 特征匹配

SURF 特征匹配算法主要用于序列图像重叠区域的特征提取和描述, 通常分为构造 Hessian 矩阵、构建尺度空间、提取特征点和生成特征描述子 4 个部分。

#### 1) Hessian 矩阵构造

SURF 算法通过 Hessian 矩阵的行列式作为判别式寻找局部最大值, 生成图像稳定关键点。以图像  $I(x, y)$  为例, 构建的二阶微分 Hessian 矩阵<sup>[23]</sup>如式(1)所示。

$$H(I(x, y)) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 i}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 i}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 i}{\partial y^2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

图像经过高斯滤波后, 图中像素点对应的 Hessian 矩阵如式(2)所示。

$$H(x, y, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(x, y, \sigma) & L_{xy}(x, y, \sigma) \\ L_{xy}(x, y, \sigma) & L_{yy}(x, y, \sigma) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $(x, y)$  为图中像素坐标,  $\sigma$  为高斯尺度因子,  $L(x, y, \sigma)$  为图像  $I(x, y)$  与高斯核  $G(x, y, \sigma)$  的卷积运算<sup>[24]</sup>。

#### 2) 尺度空间构建

考虑到拼接图像可能存在缩放或尺寸不同等情况, 为提高图像特征检测的鲁棒性, 通过原图像  $I(x, y)$  与高斯核  $G(x, y, \sigma)$  卷积运算构建尺度空间  $L(x, y, \sigma)$ , 如式(3)所示。改变高斯尺寸和尺度因子  $\sigma$ , 在不同尺度空间内使用 Hessian 矩阵判别图像局部极值点, 并提取始终保持稳定的特征点。其中图像模糊程度由尺度因子  $\sigma$  的大小决定, 通常尺度因子越小图像越清晰。SURF 算法相比 SIFT 算法, 不进行降采样处理, 算法效率更高。

$$\begin{cases} L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) \times I(x, y) \\ G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/(2\sigma^2)} \end{cases} \quad (3)$$

#### 3) 特征点提取

在特征点提取过程中通常使用  $3 \times 3$  滤波模板, 在尺度空间中遍历选取一像素点, 将该像素点与空间邻域内 26 个点进行 Hessian 矩阵判别式求值比较, 若该像素点的值最大即为极值点, 视为特征点, 因此图像像素尺寸大小直接影响特征提取的效率。对获取的特征点  $(x, y)$  求取梯度方向, 计算其邻域内像素点梯度值并分析梯度方向分布特性, 将最大梯度值的方向作为特征点的主梯度方向, 其中像素点梯度幅值  $m(x, y)$  和方向  $\theta(x, y)$  求取如式(4)所示。

$$\begin{cases} m(x, y) = \sqrt{L1 - L2^2 + L3 - L4^2} \\ \theta(x, y) = \arctan \frac{L3 - L4}{L1 - L2} \end{cases} \quad \begin{matrix} L1 = L(x+1, y) \\ L2 = L(x-1, y) \\ L3 = L(x, y+1) \\ L4 = L(x, y-1) \end{matrix} \quad (4)$$

#### 4) 特征描述子生成

以提取的特征点为中心, 根据主梯度方向选取一个边长为 20 尺度的正方形, 将正方形分为 16 个子正方形区域, 对每个子区域中 25 个像素点进行 Haar 小波响应求值, 统计 25 个像素的垂直方向值之和、垂直方向绝对值之和、水平方向值之和、水平方向绝对值之和, 最终每个特征点形成 64 维描述子, 特征描述子示意图如图 1 所示, 通过计算描述子的距离完成特征匹配。

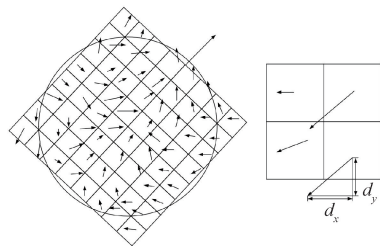


图 1 SURF 特征描述子示意图

Fig. 1 Schematic of SURF feature descriptor

传统图像拼接算法通过以上 SURF 特征匹配法对待拼接图像整体进行特征检测, 该方法虽然能够实现检测的全面性, 但降低了特征匹配的效率。零部件图像大量相似特征主要包括整体灰度分布均匀且特征单一的表面和倒角处, 传统算法检测过程中受较多相似特征点干扰从而增大特征误匹配率<sup>[18]</sup>。因此, 本文提出基于重叠区域定位的 SURF 特征匹配方法, 创新特征匹配定位策略, 提升图像特征检测效率和准确性。

通常情况下相邻拼接图像重叠率在 30%~50%, 重叠率越高, 拼接精度越高<sup>[25]</sup>, 本文以 50% 图像重叠率进行零部件序列图像采集。为解决传统拼接算法对图像全局特征检测效率低且误差大的问题, 本文对拼接图像有效特征点检测区域进行定位, 基于图像采集重叠率获取检测区域尺寸, 根据拼接方向确定检测区域的起始和终止位置。有效特征点检测区域定位原理图如图 2 所示, 图像像素尺寸为  $M \times N$  pixels, 当横向拼接时, 图中 img1 为参考图像, 检测区域起始位置为图像 img1 的右边界  $L_1$ , 终止位置为图中的  $L_2$ ,  $L_2$  与  $L_1$  的距离为  $M/2$ , 检测区域的高度为  $N$ , 灰色区域 a 即为参考图像中定位的检测区域。img2 为待配准图像, 检测区域起始位置为图像 img2 的左边界  $L_3$ , 终止位置为图中的  $L_4$ ,  $L_3$  与  $L_4$  的距离为  $M/2$ , 检测区域的高度为  $N$ , 灰色区域 b 即为待配准图像中定位的检测区域。同理可完成纵向拼接有效特征点检测区域的定位。在完成检测区域定位后, 进行特征点检测, 将提取的特征点通过快速最近邻搜索 (fast library for approximate nearest neighbors,



FLANN)算法进行匹配,该方法匹配速度快,对特征进行聚类建模,搜索到最近邻与次临近的特征点,并基于欧氏距离计算判定特征点的相似性,计算参考图像检测区域中特征点  $P_i$  与待配准图像检测区域中特征点  $P_j$  的欧氏距离,当欧氏距离越小,相应的两个特征点的相似性越高,匹配度越高,以此方法快速高效获取相应配对的特征点  $P_1, P_2, P_n$  和  $P'_1, P'_2, P'_n$ 。欧氏距离公式为:

$$d(P_i, P_j) = \sqrt{\sum_{i=1}^6 (x_i - y_i)^2} \quad (5)$$

式中:  $d$  为欧氏距离,  $x_i$  和  $y_i$  分别为  $P_i$  和  $P_j$  的描述子。

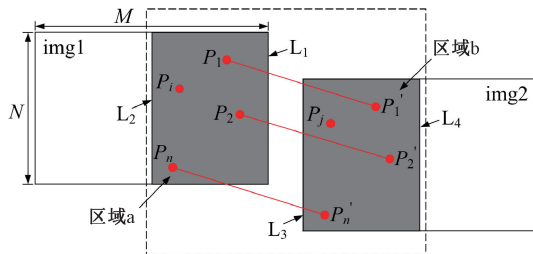


图 2 检测区域定位原理图

Fig. 2 Schematic diagram of detection area localization

通过上述方式,在特征定位区域进行特征匹配,减小特征点检测的范围,从而提高特征点匹配的效率。为降低误匹配率,将所有匹配点对的欧氏距离进一步排序筛选,提取距离小、匹配度高的特征点对,提高匹配的准确性。

## 1.2 RANSAC 精确匹配

通常情况下采用 SURF 特征匹配法获取的相似特征点数量较多,且容易存在误匹配问题,无法保证匹配的准确性,影响图像拼接精度。因此本文提出 RANSAC 算法对特征点进行精确匹配,求取单应性矩阵,通过该矩阵对特征点进行变换,将变换后的点与对应真实的点进行误差计算,判断误差较小的特征点为内点,迭代求取内点数量最多的特征点对,并计算最优单应性矩阵  $H$ ,特征点单应性矩阵变换如式(6)所示。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 & h_5 \\ h_6 & h_7 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $(x, y)$  为待配准图像中的像素坐标,  $(x', y')$  为经单应性矩阵变换后的像素坐标,  $h_0, h_1, h_3$  和  $h_4$  是尺度旋转变化量,  $h_2$  和  $h_5$  分别为水平和垂直方向的位移量,  $h_6$  和  $h_7$  分别为水平和垂直方向的变化量。

## 1.3 改进图像配准

在完成特征点精确匹配后,需要对图像进行配准,将参考图像与待配准图像转化到统一坐标系内,实现图像拼接。传统拼接方式原理图如图 3 所示,其中向右拼接原理如图 3(a)所示,向左拼接原理如图 3(b)所示,向上拼接原理如图 3(c)所示,向下拼接原理如图 3(d)所示。图中 img1 作为参考图像,其左上角像素点坐标(0,0)即为全景图像左

上角坐标,当待配准图像 img2 向左或向上拼接时,其部分特征不在全景图像坐标系内则无法显示,需要调整单应性矩阵内的  $h_2$  或  $h_5$  参数,将配准图像位移进全景图像坐标系。因此,为方便图像拼接,通常选用向右和向下拼接方式。

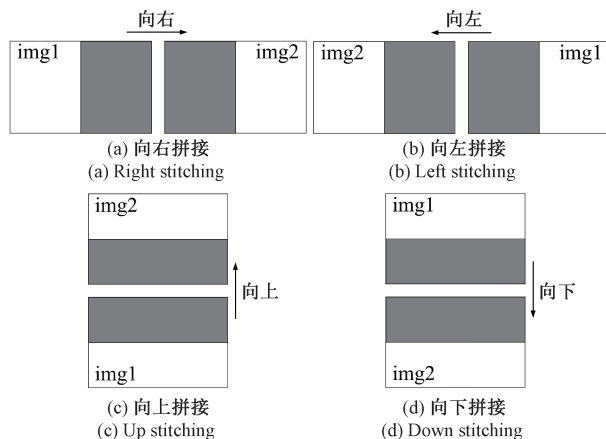


图 3 图像拼接方向

Fig. 3 Image stitching direction

为突出圆形零部件边缘特征,将零部件置于白色背景载物台上进行图像采集。为提高序列拼接图像的采集效率,通常沿着圆特征进行如图 4 所示的“O”型轨迹分步拍摄,单次图像采集需要保证零部件局部特征出现在相机视野内,拼接时两幅图像存在如图 5 所示的相对位置,图中灰色区域为两幅拼接图像的重叠区域,黑色区域为两幅图像拼接为全景图像后,缺失的零部件图像背景区域所呈现的成像效果。全景图像中的黑色特征将会影响到后续零部件图像检测的准确性,因此需要对图像配准方法进行改进。考虑到缺失的背景区域为白色,本文提出以相同尺寸分别扩充参考图像左侧区域和待配准图像右侧区域的方式,将扩充区域置为白色,能够有效消除全景图像中的黑色特征,保证图像检测的准确性。

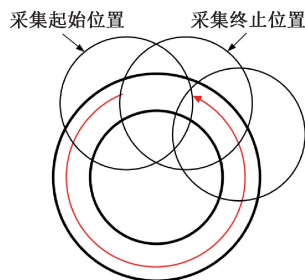


图 4 采集轨迹示意图

Fig. 4 Schematic of acquisition trajectory

## 1.4 图像融合

在图像采集过程中,通常易受曝光、光照均匀度差异和拍摄环境等外界因素影响,图像拼接时采用像素点直接叠加的方式可能造成图像重叠区域拼接处存在不连续的现



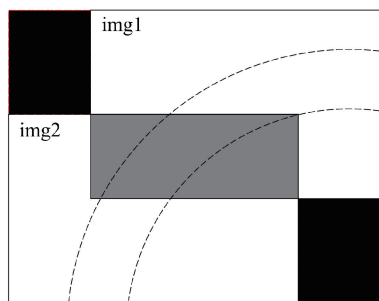


图 5 背景缺失拼接示意图

Fig. 5 Schematic of missing background stitching

象。因此,需要对拼接处进行图像平滑处理,本文提出加权平均融合算法,能够有效解决拼接处像素灰度突变的问题,从而获取高质量平滑全景零部件图像。加权平均融合算法主要对两幅拼接图像的重叠区域像素灰度进行权重分配,如式(7)所示。其中用于描述灰度的权重系数由式(8)自适应获取。

$$I(x, y) = \begin{cases} I_1(x, y), & (x, y) \in I_1 \\ a_1 I_1(x, y) + a_2 I_2(x, y), & (x, y) \in (I_1 \cap I_2) \\ I_2(x, y), & (x, y) \in I_2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} a_1 = \frac{x - X_{\text{start}}}{X_{\text{end}} - X_{\text{start}}} \\ a_2 = \frac{X_{\text{end}} - x}{X_{\text{end}} - X_{\text{start}}} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $I(x, y)$  为平滑处理后的图像灰度值,  $I_1(x, y)$  和  $I_2(x, y)$  分别为融合前的两幅图像灰度值,  $a_1$  和  $a_2$  分别为  $I_1$  和  $I_2$  重叠区域的像素灰度权重,其中  $a_1 + a_2 = 1, 0 < a_1 < 1, 0 < a_2 < 1$ ,  $x$  为重叠区域内像素点的横坐标,  $X_{\text{start}}$  和  $X_{\text{end}}$  分别为重叠区域左边界起始点的横坐标和右边界结束点的横坐标。

### 1.5 改进最小二乘法拟合圆

以深沟球轴承零部件为例,通过上述图像拼接算法可获取高分辨率圆形零部件全景图像。为实现高精度圆形零部件尺寸测量,采用 Canny 算法与 Zernike 矩算法相结合的边缘检测算法<sup>[26]</sup>对图像进行亚像素边缘提取。提取的图像特征点除了零部件内外圆环边缘像素点,还存在大量表面特征像素点和噪声点,为获取准确的圆拟合边缘像素点,需要对图中提取的像素点进行搜索筛选。针对深沟球轴承、平面推力轴承片、金属固定环等圆环类零部件图像,本文提出一种基于圆心点估计遍历搜索边缘点的方法,能够准确筛选出有效边缘像素点。如图 6 和 7 所示分别为圆形零部件边缘像素点筛选原理图和本文改进的最小二乘法拟合圆流程图,具体搜索筛选步骤为:

1) 深沟球轴承图像拼接后的分辨率为  $9\,000 \times 9\,000$  pixels, 首先对图像保存的所有边缘点进行遍历搜索,从左上角坐标(0,0)开始,按先从左往右,后从上往下的方式,搜索到第

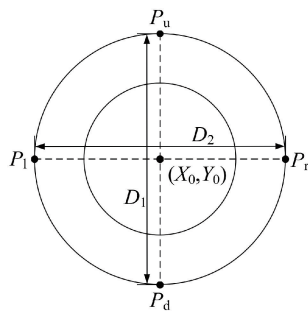


图 6 边缘像素点筛选原理图

Fig. 6 Schematic diagram of edge pixel point filtering

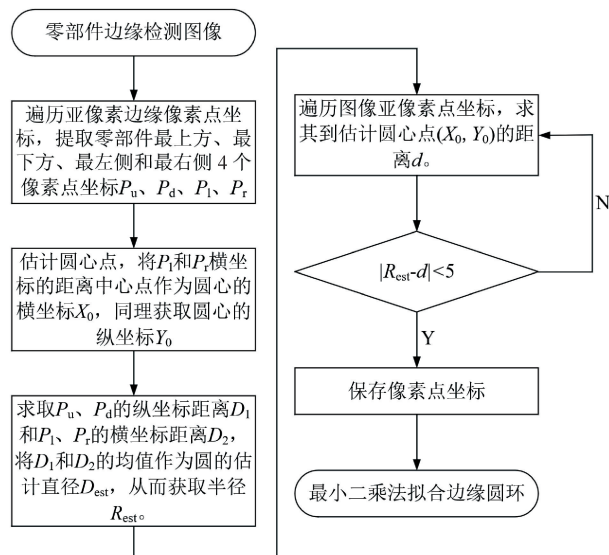


图 7 改进最小二乘法拟合圆流程图

Fig. 7 Flow chart of improved least squares fitting circle

一个边缘点即为外圆环最上方的像素点  $P_u$ ; 按先从上往下, 后从左往右的方式, 搜索到第一个边缘点即为外圆环最左方的像素点  $P_l$ 。接下来, 从右下角坐标(9 000, 9 000)开始, 按先下往上, 后从右往左的方式, 搜索到第一个边缘点即为外圆环最右方的像素点  $P_r$ ; 按先右往左, 后下往上的方式, 搜索到第一个边缘点即为外圆环最下方的像素点  $P_d$ 。

2) 采用遍历搜索到的 4 个顶点坐标估计圆心点坐标, 将  $P_l$  和  $P_r$  横坐标距离  $D_2$  的中心点  $X_0$  作为圆心点横坐标, 将  $P_u$  和  $P_d$  纵坐标距离  $D_1$  的中心点  $Y_0$  作为圆心点纵坐标, 获取估计圆心点  $(X_0, Y_0)$ 。对  $D_1$  和  $D_2$  求均值  $D_{\text{est}}$  作为外圆环估计直径, 从而获取估计半径  $R_{\text{est}}$ 。

3) 遍历图像所有提取的亚像素坐标, 分别求其到估计圆心点  $(X_0, Y_0)$  的距离  $d$ , 将距离  $d$  与估计半径  $R_{\text{est}}$  求差值绝对值  $|R_{\text{est}} - d|$ , 其中满足  $|R_{\text{est}} - d| < 5$  的亚像素坐标即为有效外圆环边缘像素点。

4) 同理对内圆环边缘像素点进行搜索筛选。

在准确提取图像内外圆环有效边缘点后, 综合考虑圆拟合算法高效率和高精度要求, 本文采用最小二乘法拟合

圆算法<sup>[27]</sup>,获取零部件内外圆环直径尺寸。

### 1.6 图像拼接及零部件尺寸测量的实现

本文为实现大尺寸圆形零部件尺寸测量,通过图像拼接获取圆形零部件高分辨率全景图像,对零部件内外圆环直径尺寸进行高精度测量,如图 8 所示,为圆形零部件尺寸测量流程图。

步骤 1)针对不同零部件,基于 TracePro 光源仿真分析<sup>[28]</sup>与零部件实际成像效果分析,选取相应最佳照明方案,提高零部件边缘照明质量。

步骤 2)基于 50%图像重叠率,沿零部件圆形特征进行“O”型轨迹逐步采集序列图像。

步骤 3)改进 SURF 特征匹配算法,定位图像重叠区域进行特征粗匹配。

步骤 4)应用式(4)求取单应性矩阵,采用 RANSAC 算法进行特征精确匹配。

步骤 5)改进图像配准方法,等尺寸扩充拼接图像,解决背景缺失区域在全景图像中呈现黑色特征的问题,统一拼接图像坐标系,实现全景图像拼接。

步骤 6)应用式(5)对拼接图像进行加权平均法融合,获取高分辨率平滑全景零部件图像。

步骤 7)采用 Canny 算法与 Zernike 矩算法相结合的亚像素边缘检测算法<sup>[26]</sup>对零部件图像边缘特征像素点进行高精度提取。

步骤 8)基于圆心点估计遍历搜索边缘点,筛选出零部件内外圆环有效边缘像素点,采用最小二乘法拟合圆算法<sup>[27]</sup>获取零部件内外圆环直径像素尺寸。

步骤 9)通过系统像素当量标定值与零部件像素尺寸值求积,获取零部件实际尺寸值。

步骤 10)同理,采用以上相同方法分别对 3 种典型圆形零部件实际尺寸进行高精度测量。

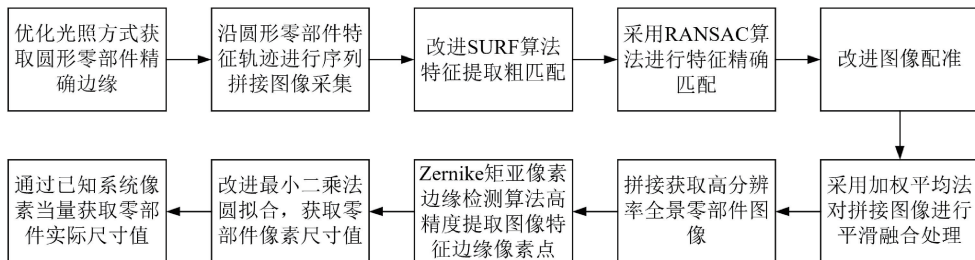


图 8 圆形零部件尺寸测量流程图

Fig. 8 Flow chart for dimensional measurement of circular parts

## 2 实验结果分析

### 2.1 实验平台搭建

为验证光照优化方法的效果和改进图像拼接算法的性能,设计图像采集平台原理图如图 9 所示,搭建实验平台如图 10 所示。图像采集平台硬件装置主要包括三轴移动滑台、海康威视型号为 MV-CS200-10UM 的 2 000 万像素黑白面阵 CMOS 工业相机、德鸿视觉型号为 M150-04XMPW 且工作距离为 150 mm 的双远心镜头、可调环形和条形白光源、上位机等。上位机系统为 Windows 11,图像处理软件为 OpenCV 3.4.1 版本,光源仿真分析软件为 TracePro 7.0.3 版本,处理器为 12th Gen Intel(R) Core (TM) i7-12700H 2.30 GHz,内存 16 GB。尺寸测量实验平台通过 SHAHE 三和量仪生产的 30 mm 宽度标准量块进行像素当量标定,像素当量结果为 0.006 085 64 mm/pixel。本文以深沟球轴承、平面推力轴承片和金属固定环三种典型圆形零部件为实验对象,从左至右依次如图 11 所示,测量目标为内外圆直径尺寸,采用精度为 0.001 mm 的型号为思瑞 CROMA8106 的三坐标测量仪测量 3 种圆形零部件的内外直径,如图 12 所示,并作为实验对比参考数据,测得结果如表 1 所示。

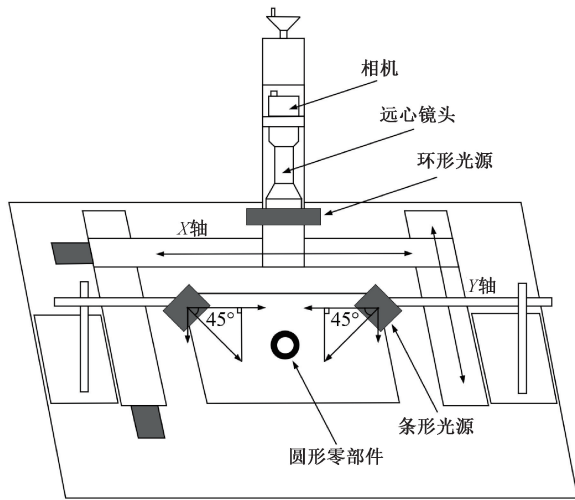


图 9 图像采集平台原理图

Fig. 9 Schematic diagram of image acquisition platform

### 2.2 光照优化对比实验

为验证本文光照优化效果,以平面推力轴承片为例,使用图像采集实验平台分别以环形光源垂直向下、条形光源两侧 45°和两种光源组合布置的照射方式采集轴承片图像,通过尺寸测量验证光照优化效果。

图像采集过程中,零部件表面的光源照度影响成像的

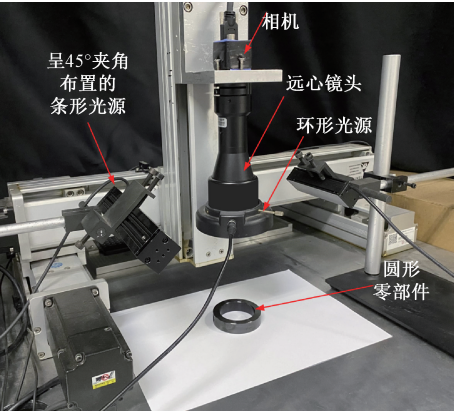


图 10 图像采集实验平台

Fig. 10 Experiment platform of image acquisition



图 12 思瑞 CROMA8106 三坐标测量仪

Fig. 12 Sirui CROMA8106 coordinate measuring machine



图 11 深沟球轴承、平面推力轴承片、金属固定环实物图

Fig. 11 Physical images of deep groove ball bearings, flat thrust bearing pieces, metal fixing rings

表 1 三坐标测量仪测得圆形零部件尺寸结果

Table 1 Results of circular parts size measured by coordinate measuring machine

零部件名称	外圆环直径/mm	内圆环直径/mm
深沟球轴承	51.993	24.994
平面推力轴承片	59.995	40.006
金属固定环	61.991	45.066

用 TracePro 光源仿真软件对 3 种光照方式下的零部件表面和倒角照度进行分析,如图 13 所示。

效果,反射进入相机的光线数量决定成像的明暗。本文采

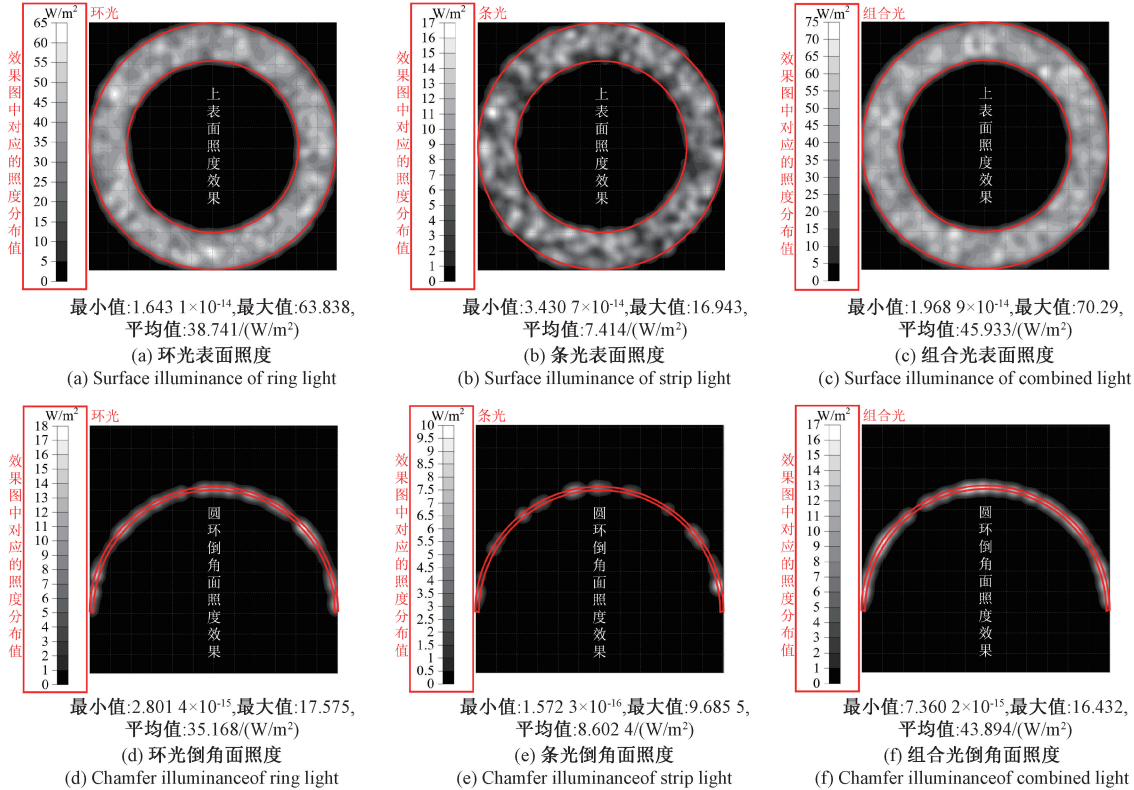


图 13 平面推力轴承片仿真照度图

Fig. 13 Simulation illuminance diagram of flat thrust bearing pieces



分析照度图可知,如图 13(a)和(d)所示,环光下轴承片表面照度略高于倒角面,都属于高照度,成像偏亮。如图 13(b)和(e)所示,条光下轴承片表面和倒角面照度都较低,成像偏暗。如图 13(c)和(f)所示,组合光下轴承片表面照度略高于倒角面,同样都属于高照度,成像偏亮。如图 13(a)、(b)和(c)所示,组合光下轴承片表面照度最高,成像高亮,条光下轴承片表面照度最低,成像偏暗。

分别采用 3 种光照方式采集轴承片图像,对实际成像

效果进行分析,如图 14(a)、(b)和(c)所示。为获取特征边缘和背景分明的轴承片图像,根据不同光源类型和照射角度,调节相应光源亮度直至边界阴影消失。如图 14(a)所示,环光照射下轴承片表面高亮,倒角面经黑处理成像为暗。如图 14(b)所示,条光照射下轴承片表面偏暗,倒角面同样成像为暗,表面存在面积较大的金属纹理及轻微擦痕。如图 14(c)所示,组合光照射下轴承片表面较亮,倒角面成像为暗,特征边界清晰锐度高。

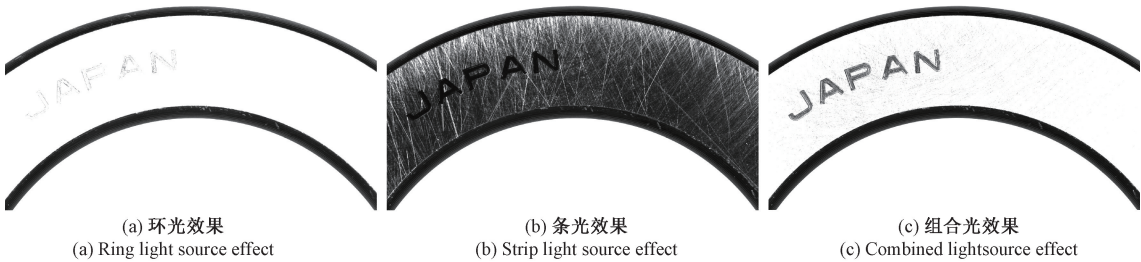


图 14 采集的平面推力轴承片局部图像

Fig. 14 Acquired local images of flat thrust bearing pieces

在结合轴承片照度仿真和实际成像分析后,选定组合光为最优光照方式。为进一步验证光照优化效果,分别对 3 种光照方式下的轴承片拼接全景图像进行尺寸测量,将测得的 3 组实际内外圆直径尺寸值与三坐标测量仪测得的尺寸参考值进行对比,如表 2 所示。

由表 2 可知,环光下测得的轴承片内外圆环直径尺寸分别为 40.074 3 和 60.046 2 mm,误差均值分别为 +68.3 和 +51.2  $\mu\text{m}$ ,与参考测量值的相对误差分别为 +0.170 7%和 +0.085 3%;条光下测得的轴承片内外圆环直径尺寸分别为 40.034 7 和 60.017 2 mm,误差均值分别为 +28.7 和 +22.2  $\mu\text{m}$ ,与参考测量值的相对误差分别为 +0.071 7%和 +0.037 0%;组合光下测得的轴承片内外圆

环直径尺寸分别为 40.009 5 和 60.003 4 mm,误差均值分别为 +3.5 和 +8.4  $\mu\text{m}$ ,与参考测量值的相对误差分别为 +0.008 7%和 +0.014 0%。原因在于环光照射下轴承片特征边缘易存在边界阴影噪声干扰,边缘提取精度下降;条光下轴承片表面面积较大的金属纹理及轻微擦痕降低了边缘提取的效率,且影响其准确性。本文提出如图 10 所示环形光源垂直向下、条形光源两侧 45°布置的组合光照射方式,能够有效消除边界阴影和噪声,以及轴承片表面纹理及擦痕,提高了边缘像素点的提取精度。

同理,完成深沟球轴承和金属固定环的光照方案选取。最终,深沟球轴承和平面推力轴承片都选用组合光照射方式,金属固定环选用条光两侧 45°照射方式。

表 2 3 种光照方式下平面推力轴承片尺寸测量结果

Table 2 Results of flat thrust bearing pieces size measured under three illumination methods

序号	环光下测得的外圆尺寸值/mm		条光下测得的外圆尺寸值/mm		组合光下测得的外圆尺寸值/mm	
	和内圆尺寸值/mm		和内圆尺寸值/mm		和内圆尺寸值/mm	
1	60.046 2	40.074 5	60.016 7	40.034 3	60.002 7	40.009 5
2	60.046 3	40.074 3	60.018 0	40.034 9	60.003 8	40.009 1
3	60.045 8	40.074 3	60.017 3	40.034 6	60.004 5	40.009 8
4	60.046 1	40.075 3	60.017 4	40.034 4	60.003 1	40.009 9
5	60.045 4	40.074 0	60.017 0	40.034 6	60.003 8	40.009 7
6	60.047 1	40.074 2	60.017 9	40.035 5	60.003 3	40.009 3
7	60.046 7	40.073 9	60.018 7	40.034 8	60.003 4	40.009 6
8	60.045 9	40.073 9	60.017 1	40.034 5	60.003 3	40.009 3
9	60.045 7	40.074 0	60.015 8	40.034 8	60.001 8	40.009 6
10	60.046 8	40.074 7	60.016 0	40.034 6	60.004 3	40.009 0
平均值	60.046 2	40.074 3	60.017 2	40.034 7	60.003 4	40.009 5
误差均值	+0.051 2	+0.068 3	+0.022 2	+0.028 7	+0.008 4	+0.003 5
相对误差/%	+0.085 3	+0.170 7	+0.037 0	+0.071 7	+0.014 0	+0.008 7

## 2.3 图像拼接对比实验

### 1) 图像拼接实验

为验证本文改进零部件图像拼接算法的有效性,分别对深沟球轴承、平面推力轴承片和金属固定环 3 种典型圆形零部件序列图像进行拼接实验,分析图像拼接效果。

如图 15(a)、(b)和(c)所示,分别为 3 种典型圆形零部件局部横向拼接图,图中区域 a 和区域 b 都为参考图像和待配准图像的重叠定位区域,在定位区域中完成两幅图像

的特征精确匹配,同理进行图像的纵向拼接。将以 50% 重叠率采集的 3 种圆形零部件序列图像分别按横向和纵向拼接方法进行组合拼接,拼接获得如图 15(d)、(e)和(f)所示的 3 种典型圆形零部件全景图像,3 幅全景图像特征清晰完整,整体平滑。分别选取如图 16(a)、(b)和(c)所示的图像融合区域局部放大图进行拼接效果分析,对应全景图拼接位置已在图 15(d)、(e)和(f)中标出。从椭圆框选的区域可以看出,拼接交界处都无灰度突变现象,特征边缘平滑无缝隙,拼接效果较好。

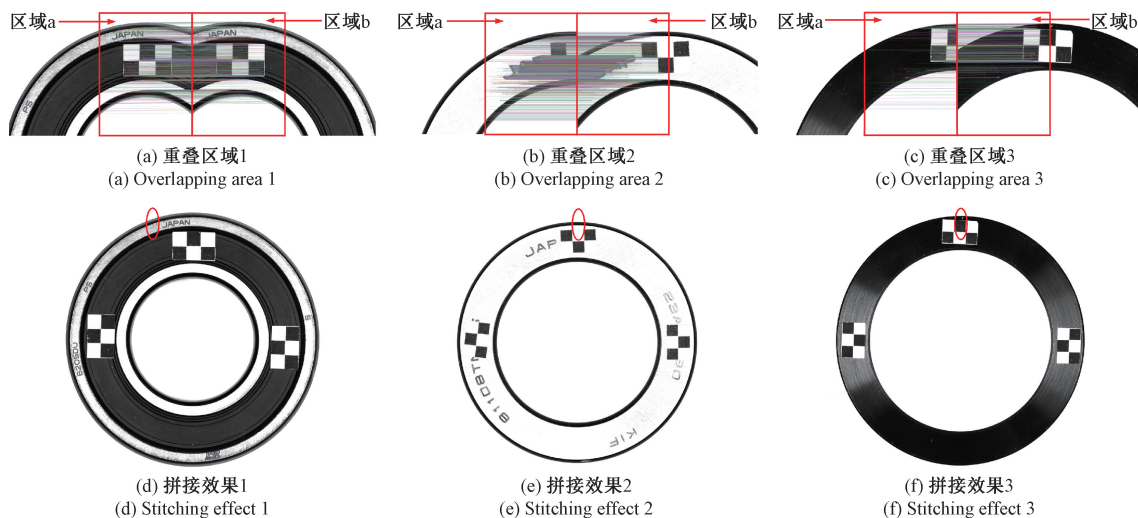


图 15 3 种圆形零部件图像拼接效果

Fig. 15 Image stitching effects of three circular parts

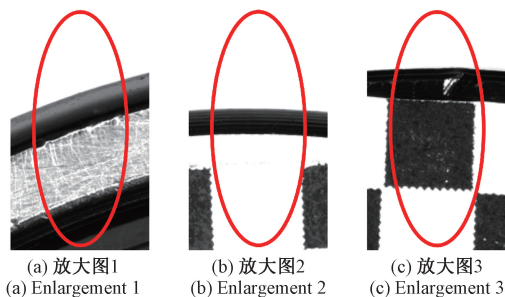


图 16 拼接处局部放大图

Fig. 16 Local enlargement of the stitching

### 2) 拼接精度分析

为进一步验证本文提出算法的拼接精度,分别测量拼接获取的三种典型圆形零部件全景图像内外圆环直径尺寸,将尺寸测量的精度作为图像拼接精度的评价指标。将本文图像拼接方法的尺寸测量精度与文献[17]、文献[18]、文献[19]图像拼接方法的尺寸测量精度进行对比,其中考虑到零部件图像实际成像效果的可拼接性和可测量性,除了文献[17]对平面推力轴承片采用其文中环形光源照射方式进行采集,其余条件与本文方法相同,均采用最优光照方案与 Zernike 矩边缘检测方法。文献[17]、

文献[18]、文献[19]与本文方法的尺寸测量值,以及参考测量值的对比如表 3、表 4 和表 5 所示。

由表 3 可知,对于深沟球轴承尺寸的测量,应用文献[17]、文献[18]、文献[19]和本文图像拼接方法测得的外圆环直径尺寸分别为 52.042 4、52.052 0、52.016 6 和 51.987 6 mm,误差均值分别为 +49.4、+59.0、+23.6 和 -5.4  $\mu\text{m}$ ,与参考测量值的相对误差分别为 +0.095 0%、+0.113 5%、+0.045 4%和 -0.010 4%。测得的内圆环直径尺寸分别为 25.036 3、25.039 4、25.026 2 和 25.005 1 mm,误差均值分别为 +42.3、+45.4、+32.2 和 +11.1  $\mu\text{m}$ ,与参考测量值的相对误差分别为 +0.169 2%、+0.181 6%、+0.128 7%和 +0.044 4%。该轴承厚度较大内圆较小,边界易出现阴影,采用条形光源 45°布置照射能够降低特征边缘噪声干扰,通过环形光源垂直向下补光能够有效消除边界阴影,提高边缘成像质量。文献[17]拼接过程中对零部件全局图像进行特征检测,能够保证检测的全面性,但易受无效相似特征干扰,拼接精度下降,影响尺寸测量精度。文献[18]拼接时对轴承小目标特征区域进行预测定位,能够快速完成特征匹配,但对于轴承表面特征位置的预测质量和准确性不易把控,影响拼接精度。文献[19]拼接算法能够有效提高拼接效率和准确度,但同样易受相似

表 3 4 种图像拼接算法下深沟球轴承尺寸测量结果

Table 3 Results of deep groove ball bearings size measured by four image stitching algorithms

序号	文献[17]算法测得的		文献[18]算法测得的		文献[19]算法测得的		本文算法测得的	
	外圆尺寸值和 内圆尺寸值/mm		外圆尺寸值和 内圆尺寸值/mm		外圆尺寸值和 内圆尺寸值/mm		外圆尺寸值和 内圆尺寸值/mm	
1	52.042 6	25.036 3	52.052 4	25.039 3	52.016 6	25.026 1	51.987 0	25.004 9
2	52.042 5	25.036 5	52.052 2	25.039 3	52.016 0	25.026 3	51.987 9	25.004 7
3	52.042 0	25.036 2	52.051 7	25.039 4	52.016 9	25.026 1	51.987 7	25.005 3
4	52.042 4	25.036 1	52.051 9	25.039 1	52.017 5	25.026 3	51.987 5	25.005 0
5	52.042 6	25.036 4	52.052 0	25.039 8	52.016 1	25.026 1	51.987 7	25.005 0
6	52.042 8	25.036 1	52.051 6	25.039 3	52.017 2	25.026 3	51.987 9	25.005 2
7	52.042 7	25.036 5	52.052 1	25.039 5	52.015 7	25.025 8	51.987 5	25.004 9
8	52.042 4	25.036 2	52.052 1	25.039 3	52.016 3	25.026 2	51.987 6	25.005 4
9	52.042 1	25.036 2	52.051 7	25.039 4	52.017 2	25.026 3	51.987 8	25.005 2
10	52.042 1	25.036 1	52.051 8	25.039 5	52.016 7	25.026 2	51.987 4	25.005 2
平均值	52.042 4	25.036 3	52.052 0	25.039 4	52.016 6	25.026 2	51.987 6	25.005 1
误差均值	+0.049 4	+0.042 3	+0.059 0	+0.045 4	+0.023 6	+0.032 2	-0.005 4	+0.011 1
相对误差/%	+0.095 0	+0.169 2	+0.113 5	+0.181 6	+0.045 4	+0.128 7	-0.010 4	+0.044 4

表 4 4 种图像拼接算法下平面推力轴承片尺寸测量结果

Table 4 Results of flat thrust bearing pieces size measured by four image stitching algorithms

序号	文献[17]算法测得的		文献[18]算法测得的		文献[19]算法测得的		本文算法测得的	
	外圆尺寸值和 内圆尺寸值/mm		外圆尺寸值和 内圆尺寸值/mm		外圆尺寸值和 内圆尺寸值/mm		外圆尺寸值和 内圆尺寸值/mm	
1	60.046 3	40.030 6	59.980 6	39.995 0	60.012 8	40.020 3	60.002 7	40.009 5
2	60.047 2	40.030 2	59.981 3	39.994 2	60.012 2	40.019 8	60.003 8	40.009 1
3	60.045 7	40.030 6	59.982 7	39.994 4	60.014 0	40.019 6	60.004 5	40.009 8
4	60.047 3	40.028 6	59.981 8	39.993 7	60.014 1	40.020 9	60.003 1	40.009 9
5	60.046 7	40.030 7	59.981 3	39.994 3	60.013 9	40.019 6	60.003 8	40.009 7
6	60.045 8	40.029 3	59.981 4	39.994 8	60.013 9	40.020 0	60.003 3	40.009 3
7	60.044 6	40.029 8	59.980 0	39.994 5	60.012 1	40.019 6	60.003 4	40.009 6
8	60.045 6	40.030 6	59.981 7	39.994 1	60.013 5	40.020 4	60.003 3	40.009 3
9	60.046 2	40.029 6	59.982 2	39.994 1	60.012 6	40.019 9	60.001 8	40.009 6
10	60.045 4	40.030 4	59.982 5	39.994 8	60.013 2	40.019 6	60.004 3	40.009 0
平均值	60.046 1	40.030 0	59.981 6	39.994 4	60.013 2	40.020 0	60.003 4	40.009 5
误差均值	+0.051 1	+0.024 0	-0.013 4	-0.011 6	+0.018 2	+0.014 0	+0.008 4	+0.003 5
相对误差/%	+0.085 1	+0.060 1	-0.022 3	-0.029 0	+0.030 4	+0.034 9	+0.014 0	+0.008 7

特征干扰影响拼接精度。本文方法对整个图像重叠区域进行特征检测,相较文献[17]、文献[18]和文献[19],有效解决了受无效相似特征干扰导致误匹配的问题,同时保证了特征匹配的全面性和稳定性,拼接精度高于传统方法,尺寸测量精度较高。

由表 4 可知,对于平面推力轴承片尺寸的测量,应用文献[17]、文献[18]、文献[19]和本文图像拼接方法测得的外圆环直径尺寸分别为 60.046 1、59.981 6、60.013 2 和

60.003 4 mm,误差均值分别为+51.1、-13.4、+18.2 和+8.4  $\mu\text{m}$ ,与参考测量值的相对误差分别为+0.085 1%、-0.022 3%、+0.030 4%和+0.014 0%。测得的内圆环直径尺寸分别为 40.030 0、39.994 4、40.020 0 和 40.009 5 mm,误差均值分别为+24.0、-11.6、+14.0 和+3.5  $\mu\text{m}$ ,与参考测量值的相对误差分别为+0.060 1%、-0.029 0%、+0.034 9%和+0.008 7%。该轴承片较薄,条形光源 45°布置照射下特征边缘清晰但表面存在面积较大的金属纹



表 5 4 种图像拼接算法下金属固定环尺寸测量结果

Table 5 Results of metal fixing rings size measured by four image stitching algorithms

序号	文献[17]算法测得的		文献[18]算法测得的		文献[19]算法测得的		本文算法测得的	
	外圆尺寸值和		外圆尺寸值和		外圆尺寸值和		外圆尺寸值和	
	内圆尺寸值/mm		内圆尺寸值/mm		内圆尺寸值/mm		内圆尺寸值/mm	
1	62.028 3	45.111 1	62.008 9	45.082 2	62.017 5	45.089 4	62.001 1	45.071 8
2	62.028 6	45.111 0	62.010 2	45.081 1	62.016 9	45.089 6	61.999 8	45.072 5
3	62.028 3	45.110 9	62.010 8	45.079 9	62.017 7	45.088 6	62.000 7	45.072 2
4	62.029 9	45.110 7	62.010 7	45.080 6	62.017 1	45.090 4	62.001 4	45.072 4
5	62.028 6	45.110 7	62.009 7	45.080 3	62.016 2	45.090 3	62.002 0	45.072 1
6	62.029 5	45.111 0	62.009 3	45.080 8	62.018 4	45.089 8	62.000 4	45.072 2
7	62.029 3	45.110 7	62.010 8	45.080 1	62.016 9	45.090 4	62.001 7	45.071 6
8	62.028 1	45.110 8	62.010 8	45.079 4	62.019 5	45.091 3	62.001 1	45.072 5
9	62.028 5	45.111 0	62.010 2	45.080 8	62.017 6	45.090 4	62.002 1	45.071 6
10	62.028 3	45.111 2	62.009 6	45.080 7	62.018 1	45.089 0	62.000 7	45.071 6
平均值	62.028 8	45.110 9	62.010 1	45.080 6	62.017 6	45.089 9	62.001 1	45.072 0
误差均值	+0.037 8	+0.044 9	+0.019 1	+0.014 6	+0.026 6	+0.023 9	+0.010 1	+0.006 0
相对误差/%	+0.061 0	+0.099 6	+0.030 8	+0.032 4	+0.042 9	+0.053 1	+0.016 3	+0.013 3

理及轻微擦痕,采用环形光源垂直向下补光能够有效消除该特征,提高轴承片整体成像质量。文献[17]采用环形光源照射,零部件特征边缘易受噪声干扰,特征边缘提取存在误差,Zernike 矩边缘检测精度下降;同样受无效相似特征影响,存在拼接误差,影响尺寸测量精度。文献[18]对轴承片小目标特征定位的质量直接影响图像拼接的精度,特征匹配缺乏全面性,存在拼接误差。文献[19]能够有效抑制噪声对图像拼接的影响,但易受无效相似特征干扰,拼接精度下降。本文方法采用组合光照方式有效提高图像采集质量,边缘提取更精确,同样以重叠区域定位特征匹配的方式,有效提高拼接精度,实现尺寸的高精度测量。

由表 5 可知,对于金属固定环尺寸的测量,应用文献[17]、文献[18]、文献[19]和本文图像拼接方法测得的外圆环直径尺寸分别为 62.028 8、62.010 1、62.017 6 和 62.001 1 mm,误差均值分别为+37.8、+19.1、+26.6 和 +10.1  $\mu\text{m}$ ,与参考测量值的相对误差分别为+0.061 0%、+0.030 8%、+0.042 9%和+0.016 3%。测得的内圆环直径尺寸分别为 45.110 9、45.080 6、45.089 9 和 45.072 0 mm,误差均值分别为+44.9、+14.6、+23.9 和+6.0  $\mu\text{m}$ ,与参考测量值的相对误差分别为+0.099 6%、+0.032 4%、+0.053 1%和+0.013 3%。该固定环表面为黑色反光材质,内圆较大,环形光源随镜头移动照明的方式会导致固定环表面存在光斑且随着光源移动而变化,成像效果无法实现图像的有效拼接,采用条形光源 45°固定布置的照射方式,能够消除固定环倒角特征的宽边缘且内外圆环边界清晰无阴影,提高了固定环的成像质量。文献[17]、文献[18]和文献[19]同样如上述原因,存在图像拼接误差影响尺寸测量精度,本文方法同样对固定环具有较好的拼接

效果,尺寸测量精度较高。

由表 3、表 4 和表 5 可知,本文方法相较文献[17]、文献[18]和文献[19],测量 3 种圆形零件的尺寸精度更高,适用性较好。文献[17]、文献[18]对深沟球轴承的测量精度相近,文献[19]测量精度略高于文献[17]和文献[18],文献[18]对于平面推力轴承片和金属固定环的测量精度都高于文献[17]和文献[19],由此可见在特征定位准确的情况下,特征匹配准确率能够有效提高,从而提升图像拼接精度,实现高精度尺寸测量。

综合上文分析可以看出,在工业大尺寸圆形零部件尺寸视觉测量过程中,选用最优光照方式,能够采集边缘信息准确的零部件序列拼接图像。在拼接过程中,基于重叠区域定位进行特征提取,能够有效提高特征匹配的效率和准确性。改进图像配准方法,等尺寸扩充拼接图像,消除全景图像黑色背景特征,能够有效提高图像检测的准确性。通过本文提出的图像拼接方法,对序列零部件图像进行拼接,获取高分辨率全景图像,高精度图像拼接方法能够提升全景图像的精确性,从而实现圆形零部件尺寸的高精度测量。

3 结 论

本文针对圆环类零部件在环形光源和条形光源照射方式下进行尺寸测量时,通常存在零部件倒角特征成像出现宽边缘、受厚度影响导致圆环边界呈现阴影、表面纹理及擦痕影响图像处理效率、零部件图像拼接精度无法满足高精度尺寸测量等问题,提出一种基于改进 SURF 图像拼接的圆形零部件尺寸测量方法。在光源优化阶段,为消除倒角特征在成像中的宽边缘,采用条光两侧 45°布置的照

射方式;为消除在零部件成像中存在阴影、纹理及擦痕等对尺寸测量的影响,采用环光垂直向下和条光两侧  $45^\circ$  布置的组合照射方式。在图像拼接阶段,首先,为提升特征点匹配效率和准确率,改进 SURF 特征匹配法,定位拼接图像重叠区域并进行粗匹配。接着,为提升图像拼接精度,改进图像配准方法,采用 RANSAC 算法精匹配特征点,等尺寸扩充零部件拼接图像,补充缺失背景区域。然后,为消除拼接处缝隙获取平滑高分辨率零部件全景图像,提出加权平均融合算法对拼接图像进行平滑处理。最后,为实现零部件尺寸测量,改进最小二乘法拟合圆方法以实现图像中边缘圆环拟合。实验结果表明,本文方法相比传统视觉测量方法精度更高,与三坐标测量仪测量参考值相对误差在 0.044 4% 以内。在工业大尺寸零部件尺寸视觉测量中,通过本文提出的零部件图像拼接方法,能够精确获取高分辨率零部件全景图像,实现大尺寸圆形零部件尺寸的高精度测量。

## 参考文献

- [1] JIANG B, DU X, WU L, et al. Visual measurement of the bearing diameter based on the homography matrix and partial area effect[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2024, 238(6): 2034-2043.
- [2] 石照耀, 孙衍强. 齿轮法向啮合齿廓及其测量[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3): 8-15.  
SHI ZH Y, SUN Y Q. Gear profile of the path of contact and its measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 8-15.
- [3] 赵文辉, 张浩, 魏喆. 角接触球轴承凸出量光学精密测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(11): 22-29.  
ZHAO W H, ZHANG H, WEI ZH. Research on optical precision measurement method of angular contact ball bearings protrusion[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(11): 22-29.
- [4] 焦博, 刘国宁, 赵孟轩, 等. 基于机器视觉的亚像素精度法兰盘尺寸测量方法[J]. 现代制造工程, 2022(7): 121-126.  
JIAO B, LIU G N, ZHAO M X, et al. Flange size measurement method based on machine vision with sub-pixel precision [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(7): 121-126.
- [5] 王锐锋, 徐智浩, 刘成沛, 等. 机械系统直轴零件直径高精度视觉测量方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2023(7): 111-116.  
WANG R F, XU ZH H, LIU C P, et al. Research on high-precision visual measurement method of diameter of straight-axis parts of mechanical system [J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(7): 111-116.
- [6] 邓能辉, 石杰, 吴昆鹏, 等. 三维点云拼接的型钢轮廓测量实验平台设计[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(2): 33-38.  
DENG N H, SHI J, WU K P, et al. Design of experimental platform for profile measurement of structural steel based on 3D point cloud registration[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2024, 43(2): 33-38.
- [7] WU X, GAO G. LED light design method for high contrast and uniform illumination imaging in machine vision[J]. Applied Optics, 2018, 57(7): 1694-1704.
- [8] 谢俊, 李玉萍, 左飞飞, 等. 基于机器视觉的孔类零件尺寸在线检测[J]. 电子测量技术, 2021, 44(2): 93-98.  
XIE J, LI Y P, ZUO F F, et al. On-line dimension detection of hole parts based on machine vision[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(2): 93-98.
- [9] 张炳星, 高军伟, 王建冲, 等. 基于机器视觉的圆形垫圈尺寸测量系统设计[J]. 工具技术, 2023, 57(7): 141-145.  
ZHANG B X, GAO J W, WANG J CH, et al. Design of measuring system for circular gasket size based on machine vision[J]. Tool Engineering, 2023, 57(7): 141-145.
- [10] 唐寒冰, 巢渊, 刘文汇, 等. 基于机器视觉的大尺寸零件测量方法研究综述[J]. 电子测量技术, 2021, 44(17): 33-40.  
TANG H B, CHAO Y, LIU W H, et al. Review of measurement methods of large-size parts based on machine vision [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(17): 33-40.
- [11] 李纪强, 孔令华, 海燕. 基于图像拼接的直线轴承长度测量方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(8): 148-154.  
LI J Q, KONG L H, HUA H Y. Method of length measurement for linear bearing based on image mosaic[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(8): 148-154.
- [12] 张宇, 戴娜, 戈海龙, 等. 基于图像拼接的电连接器插针检测方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2023(12): 99-104, 126.  
ZHANG Y, DAI N, GE H L, et al. Research on detection method of electrical connector pin based on image mosaic[J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(12): 99-104, 126.
- [13] 张立立, 鲍喜荣, 王彤, 等. 基于图像处理技术的集成电路焊接质量监测系统研究[J]. 电子器件, 2023, 46(1): 57-61.  
ZHANG L L, BAO X R, WANG T, et al. Research on integrated circuit welding quality monitoring system

- based on image processing technology[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2023, 46(1): 57-61.
- [14] 魏琮. 基于分数阶傅立叶变换的图像配准方法改进[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2022.  
WEI C. Improvement of image registration method based on fractional fourier transform[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [15] GUO X, YANG J, LIN H. Image registration method based on improved SIFT algorithm and essential matrix estimation [C]. 2017 IEEE International Conference on Information and Automation(ICIA). IEEE, 2017: 814-815.
- [16] 杨祥, 周楠. 改进 SIFT 的特征提取与图像拼接方法[J]. 桂林理工大学学报, 2023, 43(1): 131-136.  
YANG X, ZHOU N. Improved SIFT feature extraction and image mosaic method[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2023, 43 (1): 131-136.
- [17] 黄晓, 杨炯, 张爱梅. 基于机器视觉的齿轮图像拼接方法研究[J]. 机械设计与制造, 2021, (2): 257-261.  
HUANG X, YANG J, ZHANG AI M. Research on gear image mosaic method based on machine vision [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021, (2): 257-261.
- [18] 黄家广, 玉振明, 彭国晋, 等. 基于载物台运动信息的显微图像拼接算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(8): 446-455.  
HUANG J G, YU ZH M, PENG G J, et al. Microscopic image stitching algorithm based on stage motion information [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(8): 446-455.
- [19] 毛清华, 王孟寒, 胡鑫, 等. 改进 SURF-FLANN 的综合工作面视频拼接特征提取与匹配算法[J/OL]. 煤炭学报: 1-12 [2024-07-06]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1560>.  
MAO Q H, WANG M H, HU X, et al. Improved SURF-FLANN feature extraction and matching algorithm for video stitching of fully mechanical mining face[J/OL]. Journal of China Coal Society; 1-12 [2024-07-06]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1560>.
- [20] 刘杰, 游品鸿, 占建斌, 等. 改进 SIFT 快速图像拼接和重影优化[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9): 2076-2084.  
LIU J, YOU P H, ZHAN J B, et al. Improved SIFT fast image stitching and ghosting optimization algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(9): 2076-2084.
- [21] 杨宇, 赵成星, 张晓玲. 基于 SURF 和改进 RANSAC 的图像拼接方法[J]. 激光杂志, 2021, 42(4): 105-108.  
YANG Y, ZHAO CH X, ZHANG X L. Image stitching method based on SURF and improved RANSAC[J]. Laser Journal, 2021, 42(4): 105-108.
- [22] 刘天赐, 宋延嵩, 李金旺, 等. 基于 ORB 特征的高分辨率图像拼接改进算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 85-92.  
LIU T C, SONG Y S, LI J W, et al. Improved algorithm for high-resolution image stitching based on ORB features[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 85-92.
- [23] 杜威, 陈胜. 基于 Hessian 自适应增强的口腔结构光图像处理[J]. 控制工程, 2023, 30(3): 543-551.  
DU W, CHEN SH. Image processing of intraoral structured light based on Hessian adaptive enhancement[J]. Control Engineering of China, 2023, 30(3): 543-551.
- [24] 郭晓磊, 刘悦, 王青正. 基于改进高斯卷积核的复杂场景红外图像目标识别研究[J]. 激光杂志, 2023, 44(5): 169-173.  
GUO X L, LIU Y, WANG Q ZH. Research on complex scene infrared image target recognition based on improved Gaussian convolution kernel[J]. Laser Journal, 2023, 44(5): 169-173.
- [25] 贾婷婷, 王慧琴, 王可, 等. 相位相关性增强的自适应低重叠率多光谱图像快速拼接算法[J]. 液晶与显示, 2022, 37(4): 483-493.  
JIA T T, WANG H Q, WANG K, et al. Adaptive low overlap multispectral image fast mosaic algorithm based on phase correlation enhancement[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2022, 37(4): 483-493.
- [26] 刘利平, 孙健, 孙文悦. 改进 Zernike 矩的亚像素圆孔类零件测量方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(4): 69-77.  
LIU L P, SUN J, SUN W Y. Measurement method of subpixel circular hole parts based on improved Zernike moment [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(4): 69-77.
- [27] 陈怡然, 廖宁, 刘超. 基于机器视觉的圆形零件尺寸参数测量[J]. 工具技术, 2022, 56(3): 109-113.  
CHEN Y R, LIAO N, LIU CH. Dimension measurement of circular parts based on machine vision [J]. Tool Engineering, 2022, 56(3): 109-113.
- [28] 朱天凤, 徐彬, 罗海燕. 一种收集激光切割热辐射光的光学装置[J]. 应用激光, 2021, 41(2): 395-398.  
ZHU T F, XU B, LUO H Y. An optical device for collecting thermal radiation from laser cutting [J]. Applied Laser, 2021, 41(2): 395-398.

## 作者简介

巢渊, 博士, 副教授, 主要研究方向为机器视觉测量与检测、机电一体化装备智能控制技术等。

E-mail: chaoyuan@jst.edu.cn