

基于显微机器视觉的大尺寸钢球 直径精密分组方法

李彦清¹, 唐琪¹, 张悦¹, 徐畅¹, 修航²

(1. 长春理工大学机电工程学院, 长春 130022; 2. 长春理工大学重庆研究院, 重庆 401135)

摘要:提出一种基于显微机器视觉的大尺寸轴承钢球直径相对测量与分组方法,该方法通过微变形弹性机构,将钢球直径差转化为狭缝宽度变化值,以同批次中待测钢球作为基准球,将后续钢球与基准球的狭缝宽度差值作为分组依据。采用 CMOS 相机与同轴显微镜采集狭缝图像,对图像进行灰度化、混合双边滤波、阈值分割等预处理。通过改进 Canny 算子与 Zernike 矩亚像素算法提取图像边缘以实现精确定位,采用 Ransac 法拟合边缘点,同时提出“一点一线法”实现不同图像间的特征定位,在特征区域内完成狭缝宽度计算。利用不同材料搭建 5 组微变形弹性机构,根据重复性对比结果,选取加硬 304 弹性板对应机构搭建样机。实验结果表明,本文方法可实现对直径在 30~100 mm 范围内钢球的测量与分组,检测精度可达 0.2 μm ,分组后同组钢球直径差 $\leq 0.4 \mu\text{m}$ 。

关键词:大尺寸轴承钢球;显微机器视觉;相对测量;直径分组

中图分类号:TG806 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)11-3554-10

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240288

Precision grouping method for the diameter of large-sized bearing steel balls based on micro machine vision

LI Yan-qing¹, TANG Qi¹, ZHANG Yue¹, XU Chang¹, XIU Hang²

(1. School of Electromechanical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Chongqing Research Institute, Changchun University of Science and Technology, Chongqing 401135, China)

Abstract: A method for relative measurement and grouping the diameter of large-sized bearing steel balls based on micro machine vision is proposed in this article. The method transformation from the difference in diameter of steel balls to the change in slit width is achieved through a micro-deformation elastic mechanism. The steel balls to be tested in the same batch are used as reference balls, and the difference in slit width between subsequent steel balls and reference balls is used as the grouping basis. CMOS cameras and coaxial microscopes are used to capture slit images, and preprocess the images with grayscale, mixed bilateral filtering, and threshold segmentation. Edges in the image are extracted by the improved Canny

收稿日期: 2024-03-21.

基金项目: 吉林省科技厅重点研发项目(20240302047GX); 吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20220736KJ); 重庆市自然科学基金项目(CSTB2022NSCQ-MSX1326).

作者简介: 李彦清(1970-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 现代机械设计理论与方法. E-mail: liyanqing@cust.edu.cn

通信作者: 徐畅(1990-), 女, 讲师, 博士. 研究方向: 现代控制技术. E-mail: 2020800042@cust.edu.cn

operator and Zernike moment sub-pixel algorithm to achieve accurate localization, the Ransac method is used to fit edge points, and the "one point, one line method" is proposed to achieve feature localization between different images, completing slit width calculation within the feature area. Five groups of micro-deformation elastic mechanisms are built using different materials, according to the repeatability comparison results, the hardened 304 elastic plate corresponding mechanism was selected to build a prototype. The experiments results show that the method can measure and group steel balls with a diameter of 30~100 mm, and the detection accuracy can reach 0.2 μm . The difference in diameter of steel balls in the same group after grouping is $\leq 0.4 \mu\text{m}$.

Key words: large-sized bearing steel balls; micro machine vision; relative measurement; diameter grouping

0 引 言

高精度大尺寸轴承广泛应用于高铁、盾构机、风力发电等领域,但受材料、加工工艺等因素限制,国内高精度大尺寸轴承的质量和使用寿命有待进一步提高,目前这类轴承仍需大量进口。大尺寸轴承一般承受的径向载荷较大^[1],而轴承中钢球直径的一致性直接影响轴承承受载荷的均匀性和使用寿命。因此,为保证轴承中钢球直径的一致性,在现阶段机械加工难以满足要求的情况下,常采用分组装配法^[2]将同一批次钢球按照一定间隔分成若干直径尺寸接近的小组,在轴承装配时选用同组钢球,以确保所需的配合精度。

国内企业起初采用人工抽检方式测量钢球直径。例如,当时应用较广的 D051 表台,测量时需标准件校正仪器,且单次只能测量一个钢球,不仅人工误检率高,而且难以保证检测精度。随着自动化技术的发展,一些学者尝试将传感器、激光等检测技术应用于直径测量,但都未取得理想的效果。汤晓燕等^[3]提出一种基于电容传感器的钢球直径自动分选机,利用接触式测量方式,将钢球的直径转换为变间距型电容传感器的运算输出量,该装置的测量精度可达 1 μm 。陈月晨等^[4]利用电感位移传感器实现钢球直径测量,并将测量结果与钢球公差带进行对比,完成直径分选。但该方法分选精度较低,其实测精度为 5 μm 。陈刚^[5]提出基于激光三角法的轴承钢球直径相对测量方法,以待测球与标准球的直径差作为轴承钢球分组的依据。该方法检测的重复精度可达 0.5 μm ,但检测对象仅为直径范围在 3.5~25 mm 的小球。张纪磊等^[6]提出基于激光干涉法获取钢球的干涉全息图像,通过提取相关信息实现钢球在线检测分选。但该方法对每个直径批次的钢球都

需要两个标准球标定全息图像,更换直径批次时需重新选定标准球,导致经济成本与时间成本都随之增加。

针对以往钢球直径检测方法存在的检测范围小、检测精度低、需标准球标定等问题,结合机器视觉的特点,本文提出一种机械结构与显微图像相结合的大尺寸轴承钢球直径差相对测量方法,并搭建视觉检测系统,实现对直径在 30~100 mm 范围内精密钢球的直径分组。

1 检测系统及检测原理

1.1 检测系统组成

本文搭建的视觉检测系统硬件分为视觉采集模块与定位测量模块两部分,如图 1 所示。

在视觉采集模块中,采用可实现 12~100 倍连续变倍的同轴显微镜对工件进行精确放大。在蓝光点光源的照明下,采用型号为 MV-SUA1600C-T 的 CMOS 相机完成图像采集。该相机像元尺寸为 1.34 $\mu\text{m} \times 1.34 \mu\text{m}$,最高分辨率可达 4 608 $\times$ 3 456。

定位测量模块的主要装置包括由固定板、弹性板组成的微变形弹性机构与采用 K9 玻璃制成的 V 形块。弹性板与固定板之间形成一个随钢球直径变化而发生微小变形的狭缝,通过 Z 向调整机构可以调节弹性板的空间位置,从而改变待测钢球与弹性板之间的接触力大小。支撑架可保证测量过程中微变形弹性机构的稳定性。

上述所有部件均置于精密大理石减振台上,该减振台既可保证整个检测系统的水平度,又能减少低频振动对图像采集的干扰。同时,为检测系统设计暗箱(见图 2)以避免杂光影响,还可进一步降低声音等高频振动的干扰。

固定微变形弹性机构的空间位置,让不同钢球顺序通过弹性板,使弹性板与固定板间产生不同的微小变形。狭缝宽度的变化差值与弹性板自由端的弯曲挠度呈线性相关,如式(6)所示:

$$y_{DE_1} - y_{DE_m} = w_{B_m} - w_{B_1} \quad (6)$$

式中: y_{DE_1} 、 y_{DE_m} 分别为第 1 个、第 m 个钢球对应的狭缝宽度; w_{B_1} 、 w_{B_m} 分别为第 1 个、第 m 个钢球使弹性板自由端产生的挠度。

同批次钢球直径的差值可通过相应狭缝宽度的变化值计算得出,式(7)为直径差值转化公式:

$$D_1 - D_m = K_1(y_{DE_m} - y_{DE_1}) \quad (7)$$

式中: $K_1 = \frac{4a}{3L-a} \frac{1}{1 + \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}}}$ 为系统的转化参数,

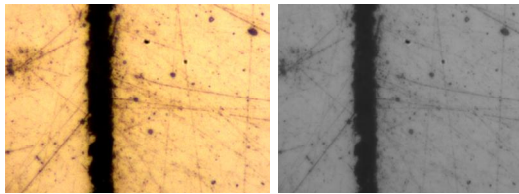
因 $a=L/2$, $\alpha=90^\circ$, 故转化系数 $K_1=0.4686$ 。

由式(5)可知,单个钢球直径 D 受多个系统物理量的影响,直接测量钢球直径会引入较大的系统误差。而式(7)中,通过相对测量完成直径差转化,有效减少了检测过程中引入的随机误差。实际测量过程中,以第 1 个测量球作为基准球,逐次测量其余钢球与基准球的狭缝宽度差值。本文通过更换 $H=50\text{ mm}$ 、 $H=25\text{ mm}$ 两种类型的 V 形块,测量范围可覆盖直径 30~100 mm 的精密钢球。

2 图像预处理算法

2.1 图像灰度化转换

利用加权平均法^[7]对分辨率为 $4\ 608 \times 3\ 456$ 的图像进行灰度化处理,目标狭缝图像的原图及灰度图如图 4 所示。



(a)原图 (b)灰度图

图 4 狭缝图像的原图和灰度图

Fig. 4 Original and grayscale images of slit images

2.2 混合双边滤波去噪

双边滤波是一种在去除图像噪声的同时,能较好地保留图像边缘细节的非线性滤波方法,但传统双边滤波算法需要人为设定的参数较多,自适应能力较差^[8]。本文对双边滤波的参数选取问

题进行改进,并进一步判定双边滤波后图像中的强噪声点,利用与双边滤波模板尺度相同的中值滤波去除强噪声点,保证更好的图像质量。混合双边滤波流程如下:

(1)设定双边滤波模板尺度($w \times w$)为 7×7 ,关联图像的尺度信息与空间标准差,按式(8)实现空间标准差 σ_d 的自适应取值:

$$\sigma_d = \text{floor}\left(\frac{w}{2}\right) + 1 \quad (8)$$

式中: $\text{floor}(\cdot)$ 为向下取整。

(2)为实现灰度标准差的自适应选取,根据全局灰度标准差(σ_1)自适应地设置灰度标准差。经过测试,按式(9)设置图像的全局灰度标准差 σ_r :

$$\sigma_r = 2\sigma_1 \quad (9)$$

(3)利用像素点间的灰度差值,构建区域相似性模型 $D(i, j)^{[9]}$,如式(10)所示:

$$D(i, j) = \frac{\sum_{k,l} \exp\left(-\frac{I(i,j) - I(k,l)}{2\sigma_g}\right)^2}{|S|} \quad (10)$$

式中: $|S|$ 为构建邻域 S 内像素点的个数; σ_g 为邻域 S 内的灰度统计参数。

当 $\sigma_g = \sigma_r$ 时,图像边缘保留程度高。因此,将符合 $|I(i, j) - I(k, l)| > \sigma_r$ 的像素点判定为强噪声点,此时式(10)可改写为:

$$D(i, j) < \frac{\sum_{k,l} \exp\left(-\frac{1}{2}\right)}{|S|} \quad (11)$$

通过式(11)判定双边滤波后图像中的强噪声点,再利用与双边滤波模板尺度相同的中值滤波,仅对判定出的强噪声点进行滤除。狭缝灰度图像经过混合双边滤波后的效果如图 5 所示。

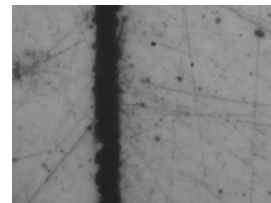


图 5 滤波效果

Fig. 5 Filter effect

2.3 图像分割

在实际检测过程中,可以借助图像分割方法找寻边缘。大津法(OTSU)是一种经典有效的阈值分割方法,可自适应确定最佳阈值,使目标对象与背景之间的像素方差最大化。因此,本文采用

OTSU 法完成狭缝图像的阈值分割,效果如图 6(a)所示。

通过 OTSU 法得到的图像仍存在许多由工件本身平整度不足、表面缺陷产生的干扰信息。这些干扰信息会导致边缘检测时,误将干扰区域的边缘判定为目标边缘,不利于后续的尺寸测量。因此,在阈值分割后需进行适当的后处理,消除干扰信息。本文针对多余干扰区域的优化过程主要如下:

(1)利用 3×3 圆形结构元素,基于形态学闭运算消除二值图像上的毛刺,并连接间断的轮廓线。

(2)将图像中的空洞区域填充为与周围相邻区域相同的像素值,减少图像缺失,使目标对象更加完整。

(3)逐行逐列地扫描图像,删除面积小于阈值 P 的连通域。本文选定的阈值为图像行数的 80%。后处理优化的效果如图 6(b)所示。

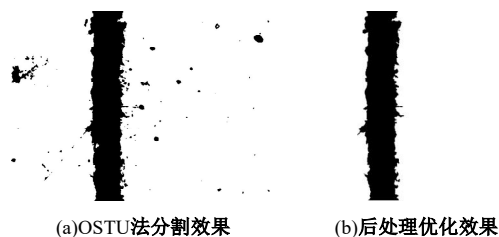


图 6 阈值分割效果

Fig. 6 Threshold segmentation effect

3 边缘检测

3.1 改进 Canny 边缘粗定位

与其他经典边缘检测算子相比,Canny 算子较受青睐。但传统 Canny 算子存在自适应能力差、边缘定位模糊的问题^[10-12],因此本文在已有算法基础上提出优化算法,实现狭缝边缘的提取。基于改进 Canny 算子的边缘粗定位流程如下:

(1)采用本文提出的自适应混合双边滤波代替高斯滤波去除杂点。

(2)利用 3×3 梯度模板对图像进行卷积运算,得出图像的梯度幅值。

(3)进行非极大值抑制。沿着梯度方向对比检测像素点的梯度是否为极大值,若是极大值则保留并判定为边缘点,若非极大值则舍弃并判定为背景。

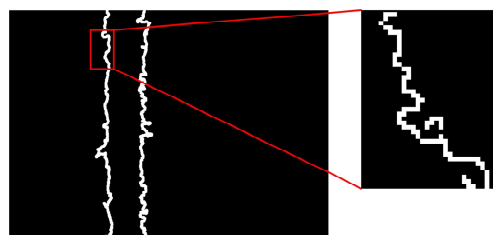
(4)选取双阈值。通过 OTSU 法得到目标与背景间方差最大时的阈值 T ,即最优阈值,将其设

为高阈值 T_h ,低阈值 T_l ,经实验分析确定两者关系为 $T_l = 0.44T_h$ 。

将梯度幅值 $> T_h$ 的像素点确定为强边缘点并赋值 1,梯度幅值 $< T_l$ 的像素点确定为非边缘点并赋值 0,梯度幅值在 T_h 与 T_l 之间的像素点确定为弱边缘点。若弱边缘点的 8 邻域内存在强边缘点,则将该点判定为强边缘点并赋值 1。不断重复上述操作,直到所有边缘点都连接起来。

(5)连通域优化。为得到两条单一的边缘线,避免阈值分割后处理对干扰区域消除不彻底,需进一步优化双阈值连接结果。遍历图像中所有连通域,只保留像素数最多的两个连通域,其余连通域赋值 0,从而保证只保留两条单一边缘线。

(6)边缘细化。引入文献[13]中的算法对图像边缘进行细化,以减小亚像素边缘定位运算量,提高边缘拟合精度。图 7 为传统 Canny 算子与本文算法检测效果对比,为方便观察,已对图像边缘进行了可视化处理。由图 7 可知,经本文优化算法处理后,狭缝图像边缘连续性更好、更加细化,保留了单一目标,方便进一步处理。



(a)传统Canny算子检测效果



(b)本文算法检测效果

图 7 边缘检测效果

Fig. 7 Edge detection effect

3.2 提取亚像素边缘

亚像素算法能够对数字图像的最小单元像素进行进一步细分,通过软件算法弥补像素级边缘检测算法的定位误差,使检测点更贴近真实坐标点^[14-16]。为确定狭缝边缘的准确位置、实现高精度测量,本文在粗定位基础上,利用 Zernike 矩亚像素算法进一步提取狭缝图像的精确位置。

Zernike 矩的边缘检测建立在理想阶跃模型

基础上,利用 Zernike 矩的图像旋转不变性计算亚像素坐标所需的参数。理想阶跃模型如图 8 所示。图 8 中, L 为图像的理想边缘,像素点 (x, y) 为单位圆的圆心,单位圆内直线 L 两侧的灰度值分别为 h 和 $h+k$, k 为两侧的灰度差, d 为圆心到理想边缘的垂直距离, α 为 d 与 x 轴的夹角。

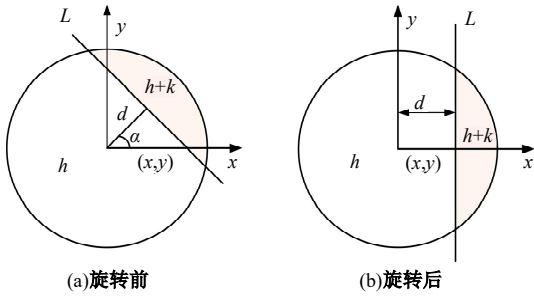


图 8 理想阶跃模型

Fig. 8 Ideal step model

若将图像逆时针旋转 α 角,则旋转前图像 Zernike 矩 Z_{nm} 与旋转后 Zernike 矩 Z'_{nm} 的对应关系如式(12)所示:

$$Z_{nm} = Z'_{nm} e^{-jma} \quad (12)$$

根据不同阶次的 Zernike 矩,可由式(13)求解图像亚像素坐标所需的 4 个参数:

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \frac{\text{Im}[Z_{11}]}{\text{Re}[Z_{11}]} \\ d = \frac{Z_{20}}{Z'_{11}} \\ k = \frac{3Z'_{11}}{2(1-d^2)^{3/2}} \\ h = \frac{Z_{00} - \frac{k\pi}{2} + r \arcsin(d) + kd\sqrt{1-d^2}}{\pi} \end{cases} \quad (13)$$

最终,通过亚像素边缘检测,得到的像素点坐标 (x', y') 如式(14)所示:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + d \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (14)$$

因存在模板放大效应,当使用 $N \times N$ 模板时,应将式(14)修改为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{Nd}{2} \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (15)$$

最后判断由式(15)得到的 Zernike 亚像素点是否满足如式(16)所示的判定条件:

$$|d| \leq \frac{2}{N} d_i \cap |h| \geq h_t \quad (16)$$

本文选取 7×7 模板,距离阈值 d_i 按照传统算

法设定为 $1/\sqrt{2}$ 。采用 OTSU 法计算图像取得最大类间方差时的最佳阈值,将该阈值设定为阶跃阈值 h_t 。若坐标点满足式(16),则判定为边缘点并保留;反之,则删除。狭缝图像亚像素边缘检测结果如图 9 所示。

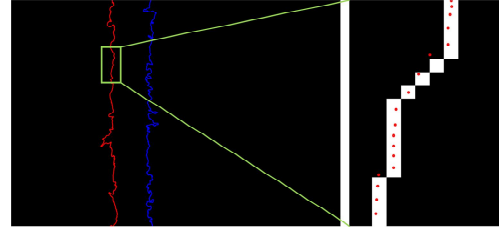


图 9 亚像素边缘检测结果

Fig. 9 Subpixel edge detection results

4 边缘拟合与尺寸测量

4.1 边缘直线拟合

本文狭缝边缘形状特征较为复杂,采用最小二乘法进行直线拟合并不能很好地得到理想边缘,因此本文采用 Ransac 法完成亚像素边缘点的直线拟合。

Ransac 法通过迭代方式从离散数据中将干扰点以外的数据点筛选出来,再对筛选出的数据点进行最小二乘拟合。相比于最小二乘法, Ransac 法融入了剔除干扰点的思想,在图像边缘较为复杂、干扰点较多的情况下,能更快地给出辨识结果。本文 Ransac 拟合法的实现步骤如下:

(1) 在亚像素边缘点集中处随机选取一定数量 N_0 的边缘点作为拟合子集(对于直线拟合, $N_0 \geq 2$),将该子集内的边缘点称作内点,利用最小二乘法对内点进行拟合,得到一条直线模型。

(2) 设定距离评估阈值 S_0 , 计算其余点到第 1 步中直线模型的距离,若距离 $< S_0$, 则将该点也视为内点并入子集,并记录内点的最大数量。

(3) 重新选择拟合子集,重复上述步骤。

(4) 比较迭代后所有拟合模型的内点数量,将内点数量最多的直线模型作为正确模型,并针对正确模型下子集内所有的内点,采用最小二乘法重新拟合直线,从而实现边缘的直线拟合。

本文设定 $N_0 = 5$, $S_0 = 15$, 将狭缝图像分为左右两侧,分别通过上述步骤完成边缘点的拟合,拟合效果如图 10 所示。

4.2 尺寸测量

由于板材表面存在一定的缺陷,狭缝边缘经高倍率光学系统放大后,并不是两条理想的平行

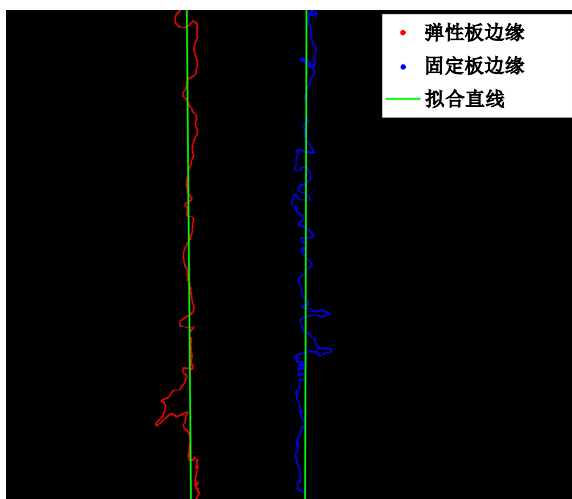


图 10 边缘拟合效果

Fig. 10 Edge fitting effect

直线。因此,可将其中一条拟合直线上各点到另一条拟合直线的距离均值作为两拟合直线的间距。

由于检测系统受到自身振动与外界环境随机因素的干扰,需找寻多幅图像中共有的特征区域,以实现检测图像的位置定位,保证参与尺寸计算的图像是同一段边缘。

狭缝图像边缘存在较多凹凸程度较大的连通区域,如图 11 所示,固定板边缘的拟合直线(L_1)“贯穿”这些小连通域,并将其分为左右两侧,且不同图像中直线 L_1 与这些连通域的位置保持固定的相对关系。因此,根据边缘特征与拟合模型之间的关系,本文提出“一点一线法”,实现不同采集图像间的匹配定位。本文狭缝图像的特定定位与尺寸测量主要通过如下步骤实现:

(1)统计每个小连通域的凸包面积(连通域内部所有像素填充后的总个数)、连通域面积(外轮廓的像素数),计算凸度(凸包面积/连通域面积),

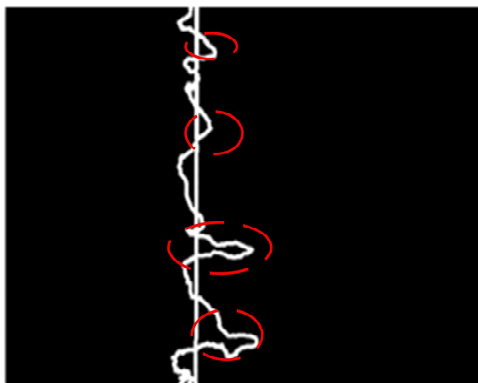


图 11 小连通域

Fig. 11 Small connected domains

将凸度最大的连通域标记为特征连通域,并将该连通域的质心 P 作为匹配算法的“一点”。

(2)计算“一点”(P)到“一线”(L_1)的垂足坐标,以该垂足点为初始坐标,在直线 L_1 上选定该点前后相邻各 n 个点作为尺寸测量的运算点。

(3)计算运算点到弹性板拟合直线(L_2)的距离均值,将其作为狭缝宽度的测量结果。对于 L_1 上的运算点(x_0, y_0),到直线 $L_2: Ax + By + C = 0$ 的距离均值如式(17)所示:

$$d = \frac{1}{2n+1} \sum_{i=1}^{2n+1} \left| \frac{Ax_0 + By_0 + C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \right| \quad (17)$$

“一点一线法”示意图如图 12 所示。

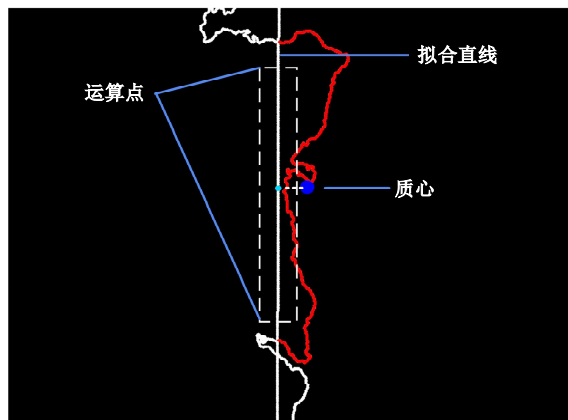


图 12 “一点一线法”示意图

Fig. 12 Schematic diagram of "one point, one line method"

5 实验分析

5.1 系统标定

为得到狭缝图像边缘宽度的实际物理尺寸,需要对视觉检测系统进行标定,本文采用标准件法进行标定^[17]。用已知标称厚度为 d 的塞尺,在与狭缝图像采集一致的工作环境下,计算出塞尺厚度对应的像素尺寸 d' ,此时视觉采集模块的像素当量 K 如式(18)所示:

$$K = \frac{d}{d'} \quad (18)$$

经过计算,本文视觉检测系统的标定系数 $K=0.018 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。

5.2 重复性检测

微变形弹性机构是视觉检测系统的核心部件,弹性板材料的物理回弹性直接影响视觉检测系统的重复定位性能。利用加硬 C5191、加硬 304、65 Mn、加硬 301、加硬 420J2 这 5 种材料,按

相同外形尺寸分别制作弹性板,将这些弹性板与常规 304 材料制作的固定板组成微变形弹性机构,对比 5 组微变形弹性机构的重复定位性能,选取最优方案。5 组微变形弹性机构如图 13 所示。



图 13 5 组微变形弹性机构

Fig. 13 5 sets of micro-deformation elastic mechanisms

在弹性板与固定板间垫入标称厚度为 $0.05\pm0.003\text{ mm}$ 的塞尺,将两板夹紧,在 UNI-POL-802 型研磨抛光机上用 400#~2000# 号砂纸对两板端面进行研磨,随后用颗粒度 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 的金刚石抛光剂进行抛光处理,以保证两板端面处于同一平面,满足景深需求,使目标狭缝在视觉采集模块中清晰成像。

使待测钢球保持相同位姿进入定位测量模块,对图 13 中 5 组微变形弹性机构分别进行重复性检测,每种机构重复测量 50 次,视觉采集模块在 80 倍光学放大下连续采集狭缝图像。采用变异系数(标准差与均值之比)比较 5 组数据的稳定性。通常变异系数越小,说明数据的变异程度越小,稳定性越好,当变异程度相近时,以数据的极差 R (最大值与最小值的差值)进行补充判断。实验中使用公称直径 $\phi 60\text{ mm}$ 的 G5 级精密钢球。5 组机构的狭缝宽度像素尺寸的极差与变异系数如表 1 所示。

由表 1 可以看出,5 组机构的变异系数均过 1%,表明选取的 5 种材料都具有较好的物理回弹

表 1 狭缝宽度像素尺寸的极差与变异系数

Table 1 Range and coefficient of variation of pixel size for slit width				
序号	标准差 /pixel	均值 /pixel	极差 /pixel	变异系数 /%
1#	13.2	1 940.6	49.0	0.68
2#	9.0	2 020.1	38.0	0.44
3#	9.8	3 375.0	33.7	0.29
4#	2.1	2 948.4	7.3	0.073
5#	2.2	2 824.2	9.7	0.077

性。其中,4#机构与 5#机械的重复性相近,且优于其余 3 组。为确保检测精度,本文选用变异系数与极差更小的 4#机构,即选择由加硬 304 弹性板与 304 固定板组成的微变形弹性机构。

微变形弹性机构的重复性精度对应视觉检测系统的重复性定位精度,因此将表 1 中 4#机构对应的极差值转换为真实尺寸,即可得出本文视觉检测系统的实际检测精度。

使用 4#机构时,重复性检测过程中狭缝宽度的实际尺寸最大差值为 $0.13\text{ }\mu\text{m}$ (像素尺寸为 7.3 pixel),该数值未超过 $0.2\text{ }\mu\text{m}$,即本文视觉检测系统的重复定位精度可达 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 。

5.3 分组验证

大尺寸成品精密钢球以 G3、G5 等级为主,其验收标准如表 2 所示^[18]。

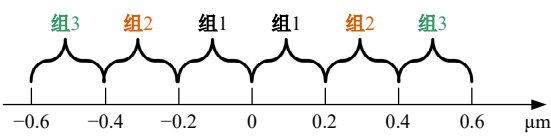
同一直径批次的大尺寸精密钢球,其直径差大都不超过 $1\sim1.5\text{ }\mu\text{m}$ 。在视觉检测系统的重复定位精度已达 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 的情况下,为排除球形误差的干扰,将分组间隔设定为 $0.4\text{ }\mu\text{m}$,按照该分组间隔可将一批钢球分为多个尺寸相近的小组,分组区间如图 14(a)所示。

钢球直径差值可由相应狭缝的宽度变化值确定,因此在实际分组过程中,无需计算钢球直径,直接以狭缝的实际尺寸作为分组依据,对应狭缝宽度实际尺寸的分组区间如图 14(b)所示。

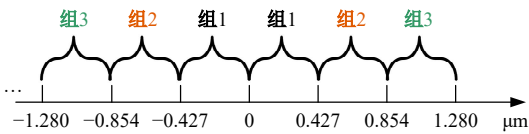
以同批次中第一个待测钢球为检测基准,计算后续钢球与基准球对应的狭缝宽度实际尺寸差

表 2 精密钢球验收标准

Table 2 Acceptance standards for precision steel balls			
球等级	球形变动量	球形误差	表面粗糙度
G3	0.08	0.08	0.01
G5	0.13	0.13	0.014



(a)钢球直径差对应分组区间



(b)狭缝宽度差对应分组区间

图 14 分组区间示意图

Fig. 14 Schematic diagram of grouping intervals

值,判断该差值在图 14(b)中所属的区间,按照对应分组区间进行分组。实验选取公称直径 $\phi 60$ mm G5 级同一批次中 10 粒精密钢球进行分组分析,分组结果如表 3 所示,其中“*”表示基准球,可见本文方法可将同批次钢球分为直径尺寸更接近的小组,分组后同组钢球的直径差 $\leq 0.4 \mu\text{m}$ 。

表 3 分组结果
Table 3 Grouping results

	像素尺寸/pixel	相互差/pixel	实际尺寸/ μm	组别
1#*	2 902.7	0.0	0.00	1
2#	2 904.3	1.6	0.03	1
3#	2 929.0	26.3	0.48	2
4#	2 898.2	-4.5	-0.08	1
5#	2 911.3	8.6	0.16	1
6#	2 923.6	20.8	0.38	1
7#	2 933.1	30.4	0.55	2
8#	2 894.7	-8.0	-0.15	1
9#	2 907.4	4.7	0.09	1
10#	2 916.6	13.9	0.25	1

6 结束语

针对现有方法检测精度低、检测钢球直径范围小的问题,本文提出一种机械机构与机器显微视觉相结合的大尺寸轴承钢球直径精密分组方法。该方法利用微变形弹性机构将钢球直径差转换为狭缝宽度变化值,采用 CMOS 相机与同轴显微镜头采集目标狭缝,对采集图像进行灰度处理、滤波去噪、图像分割、改进 Canny 算子粗定位、Zernike 矩算法精定位,最后通过 Ransac 法完成狭缝边缘直线拟合。同时,提出“一点一线法”实现不同图像间的特征定位,在特征区域内,以特征定位后运算点到弹性板拟合直线的距离均值作为狭缝宽度的像素尺寸。根据实验结果,选取 5 组微变形弹性机构中重复性最好的 4# 机构,完成系统重复性测试。结果表明,本文方法可实现对直径 30~100 mm 钢球的测量与分组,检测精度可达 $0.2 \mu\text{m}$,分组后同组钢球直径差 $\leq 0.4 \mu\text{m}$,满足预估要求。

参考文献:

- [1] 吉悦,安琦.考虑滚动体尺寸误差和径向游隙时直线轴承的力学性能分析[J].华东理工大学学报:自然科学版,2022,48(1):120-129.
Ji Yue, An Qi. Mechanical performance analysis of linear bearings considering rolling element size error and radial clearance[J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 48(1): 120-129.
- [2] 李双成,陈兴媚.选择装配法解算装配体尺寸链研究——以分组装配法为例[J].新型工业化,2020,10(4):63-65.
Li Shuang-cheng, Chen Xing-mei. Research on solving the dimensional chain of assembly bodies using selective assembly method — taking group assembly method as an example[J]. The Journal of New Industrialization, 2020, 10(4): 63-65.
- [3] 汤晓燕,云忠.轴承滚珠按直径分组自动分选[J].新技术新工艺,2000,12:14-16.
Tang Xiao-yan, Yun Zhong. Automatic sorting of bearing balls by diameter grouping[J]. New Technology & New Process, 2000, 12: 14-16.
- [4] 陈月晨,苑会娟,詹烨.基于电感传感器的滚珠分选机设计[J].制造业自动化,2015,37(4):142-145.
Chen Yue-chen, Yuan Hui-juan, Zhan Ye. Design of ball sorter based on inductive sensor[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(4): 142-145.
- [5] 陈刚.轴承球直径精密分级装置的研制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院,2010.
Chen Gang. Research and development of diameter precision grading equipment of bearing ball[D]. Harbin: School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, 2010.
- [6] 张纪磊,张勇,孙江.基于数字全息技术的钢球在线检测分选装置设计[J].新技术新工艺,2015,2015(2):19-22.
Zhang Ji-lei, Zhang Yong, Sun Jiang. Design of an online detection and sorting device for steel balls based on digital holographic technology[J]. New Technology & New Process, 2015, 2015(2): 19-22.
- [7] 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 Bo, Liu Guo-ning, Zhao Meng-xuan, et al. Subpixel precision flange size measurement method based on machine vision[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(7): 121-126.
- [8] 余博,郭雷,钱晓亮,等.一种新的自适应双边滤波算法[J].应用科学学报,2012,30(5):517-523.
Yu Bo, Guo Lei, Qian Xiao-liang, et al. A new adaptive bilateral filtering algorithm[J]. Journal of Applied Science, 2012, 30(5): 517-523.
- [9] 石坤泉,魏文国.采用双边滤波的冷轧铝板表面缺陷图像去噪方法的研究[J].表面技术,2018,47(9):

- 317-323.
- Shi Kun-quan, Wei Wen-guo. Research on denoising method for surface defect images of cold-rolled aluminum sheets using bilateral filtering[J]. Surface Technology, 2018, 47(9): 317-323.
- [10] 刘克平, 李西卫, 隋吉雷, 等. 基于改进 Canny 算法的工件边缘检测方法[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2017, 42(6): 2022-2029.
- Liu Ke-ping, Li Xi-wei, Sui Ji-lei, et al. A work-piece edge detection method based on improved Canny algorithm[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2017, 42(6): 2022-2029.
- [11] 刘宇涵, 闫河, 陈早早, 等. 强噪声下自适应 Canny 算子边缘检测[J]. 光学精密工程, 2022, 30(3): 350-362.
- Liu Yu-han, Yan He, Chen Zao-zao, et al. Adaptive Canny operator edge detection under strong noise[J]. Optical Precision Engineering, 2022, 30(3): 350-362.
- [12] 潘艳华, 金辉, 刘金国, 等. 基于改进 Canny 算法的合作靶标边缘检测[J]. 工业仪表与自动化装置, 2023(5): 83-88.
- Pan Yan-hua, Jin Hui, Liu Jin-guo, et al. Cooperative target edge detection based on improved Canny algorithm[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2023(5): 83-88.
- [13] 王家隆, 郭成安. 一种改进的图像模板细化算法[J]. 中国图象图形学报, 2004(3): 43-47.
- Wang Jia-long, Guo Cheng-an. An improved image template refinement algorithm[J]. Chinese Journal of Image and Graphics, 2004(3): 43-47.
- [14] 包昊菁, 刘思远, 任真, 等. 基于机器视觉的链轮尺寸测量方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2023, 53(10): 2795-2806.
- Bao Hao-jing, Liu Si-yuan, Ren Zhen, et al. A method for measuring chain wheel dimensions based on machine vision[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(10): 2795-2806.
- [15] 刘浩, 任宏, 赵丁选, 等. 基于亚像素定位的图像边缘检测策略研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 242-248.
- Liu Hao, Ren Hong, Zhao Ding-xuan, et al. Research on image edge detection strategy based on sub-pixel localization[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 242-248.
- [16] 吴昊荣, 李晓晓, 孙付春. 基于亚像素精度的汽车冲压件尺寸测量系统设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(3): 44-48.
- Wu Hao-rong, Li Xiao-xiao, Sun Fu-chun. Design of automotive stamping part size measurement system based on subpixel precision[J]. Combination Machine Tool and Automation Processing Technology, 2024 (3): 44-48.
- [17] 郝永平, 王永杰, 张嘉易, 等. 面向视觉测量的像素当量标定方法[J]. 纳米技术与精密工程, 2014, 12(5): 373-380.
- Hao Yong-ping, Wang Yong-jie, Zhang Jia-yi, et al. Pixel equivalent calibration method for visual measurement[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2014, 12(5): 373-380.
- [18] GB/T 308.1—2013. 滚动轴承球第 1 部分: 钢球[S].