

基于计算几何的曲轴圆度误差评定^{*}曹颖^① 侯英麟^① 张胜传^① 丁烁锟^① 窦亚萍^② 李长安^②

(①淄博市产品质量检验研究院, 山东 淄博 255000; ②山东理工大学机械工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要:为提高测量曲轴圆度误差效率等问题,提出了一种基于凸包的曲轴圆度误差视觉测量的方法。首先,对评定系统进行相机标定与畸变矫正,通过设计的采集系统来实时获取曲轴的旋转图像。然后,通过去噪和亚像素边缘检测等方法提取边缘坐标,利用三维重构手段获取圆周离散数据点。最后,提出一种基于计算几何技术的圆度评定模型,利用文献中数据进行仿真验证;以三坐标测量机的曲轴圆度误差结果作为标准值,对文章所提出的方法进行比较验证。结果表明:机器视觉检测结果较三坐标测量机绝对误差均值为 3.4 μm ,证明了圆度误差视觉评定方法有较高的准确度,可应用于曲轴圆度的评定。

关键词:机器视觉;圆度评定;计算几何;三维重构;亚像素

中图分类号:TH711 **文献标识码:**A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.08.025

Evaluation of crankshaft roundness error based on computational geometry

CAO Ying^①, HOU Yinglin^①, ZHANG Shengchuan^①, DING Shuokun^①, DOU Yaping^②, LI Changan^②

(①Zibo institute for product quality inspection, Zibo 255000, CHN; ②School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, CHN)

Abstract: Aiming at the problem in improving the efficiency of crankshaft roundness error measurement, a method of visual measurement which was used in the detection of crankshaft roundness error based on convex hull was proposed. Firstly, the camera calibration and distortion correction of roundness visual evaluation system were carried out, and the designed acquisition system was used to obtain the rotating image of the crankshaft in real time. Then, the edge coordinates were extracted by noise removal and sub-pixel edge detection, and the discrete data points were obtained by three-dimensional reconstruction. Finally, a roundness evaluation model based on computational geometry technology was proposed, and the data in literature were used for simulation verification. The results of crankshaft roundness error of CMM are taken as standard values to compare and verify the proposed methods. The results show that the mean absolute error of machine vision inspection results compared with CMM is 3.39 μm . It proves that the visual evaluation method of roundness error has high accuracy, and can be applied to the evaluation of crankshaft roundness.

Keywords: machine vision; roundness evaluation; computational geometry; 3D reconstruction; subpixel

随着我国工业的迅速发展,对工件的要求也进一步提高。曲轴作为柴油机和发动机的重要组成部分,对曲轴的检测至关重要。

圆形特征为曲轴的基本几何元素,因此圆度误差的评定是必要的^[1]。相对于传统测量技术,机器视觉检测由于高效、实时和高精度等优点,在曲轴

误差检测方面的应用前景较好。为此学者们进行了深入的研究, Jiang B C^[2]提出了一种基于改进蜂群算法的轴孔零件圆度误差评价方法。在优化设计中考虑了种群初始化和搜索机制,提高了算法的收敛精度。在轮廓线数据定义的局部搜索域中初始化种群。结果表明,与传统方法相比,该算法具有更高

* 山东省自然科学基金项目(ZR2021ME160);山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2022TSGC1164)

的精度,可广泛用于轴、孔类零件的圆度误差评定。但由于相机畸变和环境噪声的影响,零件的原始轮廓数据点可能存在误差,将给计算结果带来一些不确定性。张春阳等^[3]布置一定边长的正六边形,通过区域搜索来获得相应评定方法的圆度误差值,但每次计算需要重新调用计算公式,效率相对较低。Kshaurad K 等^[4]利用图像处理技术对圆形零件圆度误差进行测量,克服了接触式测量的缺点,但结果表明检测精度较低。Du C 等^[5]将粒子群算法应用在求解基于最小区域圆(minimum zone circle, MZC)的圆度误差中,但容易陷入局部最优解。金守峰等^[6]通过视觉检测对钢领内圈进行圆度检测,通过最小二乘法得到理想圆圆心,但是不符合最优的评定准则。

基于以上研究,传统的检测工具已经不适用,因此本文提出用高分辨率工业相机,通过数字图像重新构造曲轴截面圆周的离散点,通过改进的计算几何算法与基本数学运算求解基于 MZC 圆度误差,减少了最优法的收敛问题,降低了大量迭代的计算误差,提高了曲轴圆度误差检测的精密度。

1 视觉测量系统标定

圆度视觉评定系统为非接触式测量,为获取精确的位姿信息,使用之前需对相机进行标定,如图 1 所示。

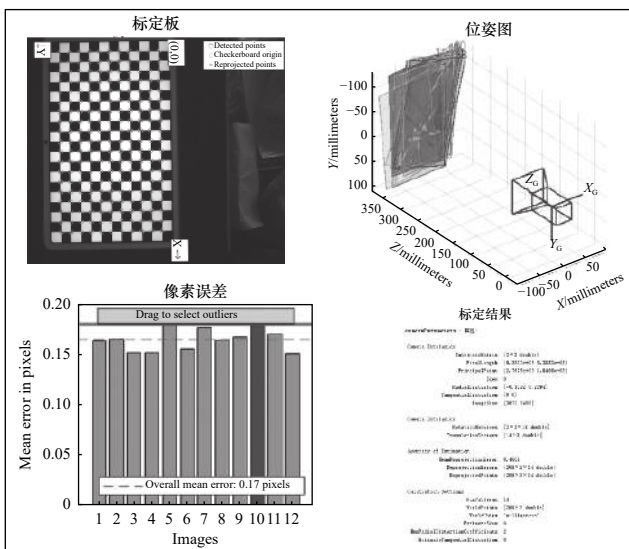


图 1 视觉测量标定

为提高检测精度,本文采用张正友法^[7]对相机进行标定。该方法使用二维棋盘格作为标定板并在不同位姿时用相机拍摄多张图像,获取多张图像内

棋盘格的二维角点坐标信息,以标定板实际角点信息作为世界基准,得到角点与像素之间的关系,最终线性求解相机的内外参数以实现高精度的测量。因为曲轴长度为 195 mm,所以标定板高度选择了 200 mm。利用内外参数进行畸变校正,其具体流程如图 2 所示。

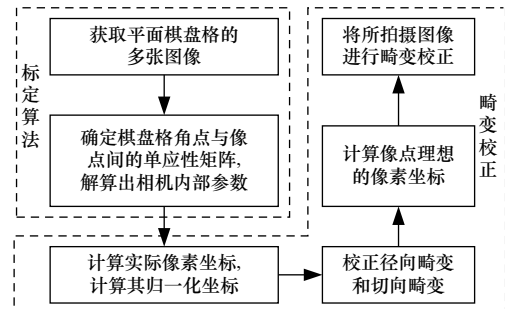


图 2 畸变校正流程

在校正时,引进 Heikkila 模型^[8],因为系统畸变不大,所以将泰勒级数展开式前 3 项,见式(1):

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0(1 + Q_1 r^2 + Q_2 r^4) + 2R_1 u_0 v_0 + R_2(r^2 + 2u_0^2) \\ v_0(1 + Q_1 r^2 + Q_2 r^4) + 2R_2 u_0 v_0 + R_1(r^2 + 2v_0^2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$r^2 = u_0^2 + v_0^2$$

式中: Q_1 、 Q_2 为径向畸变系数; R_1 、 R_2 为切向畸变系数; (u, v) 为实际像点坐标; (u_0, v_0) 为无畸变像点。

对棋盘格进行角点检测,依据角点间的距离计算像素当量,测得本系统像素当量 $K=0.016 \text{ mm/pixel}$,实现像素坐标到实际尺寸的转换。

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n S}{n P_i} \quad (2)$$

式中: K 为系统像素当量; S 为相邻角点物理尺寸; P_i 为相邻角点像素数量。

2 图像处理主要算法

2.1 亚像素检测算法

工件的真实边缘并非占满整个像素,需要精确到浮点坐标位置,为达到精密检测的要求需进行亚像素检测^[9-10]。

首先利用梯度函数(3)获得像素点梯度值,然后代入插值式(4)。

$$f(x, y) = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial y}\right)^2} \quad (3)$$

$$\varphi(x) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \frac{x-x_i}{x_i-x_j} y_i \quad (4)$$

令

$$\frac{d\varphi(x)}{dx} = 0 \quad (5)$$

所得 x 值代入式 (3) 获得对应梯度函数, 再代入式 (6)。

$$X_i = x + \frac{f(x-1, y) - f(x+1, y)}{2[f(x-1, y) - 2f(x, y) + f(x+1, y)]} \quad (6)$$

求得 X 方向的亚像素坐标 X_i , 同理可求得亚像素坐标 Y_i 。最后对亚像素点 (X_i, Y_i) 进行多项式拟合, 见式 (7)。

$$L_m(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (7)$$

亚像素级边缘提取效果可精确到约 0.2 个像素, 如图 3 所示。

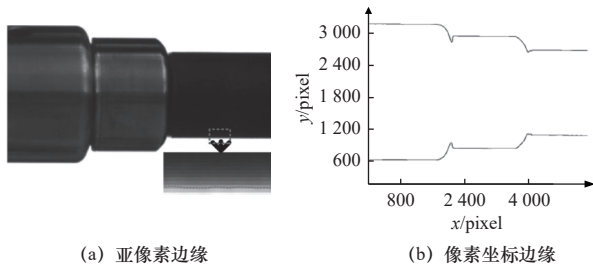


图 3 亚像素边缘细分

2.2 三维重构

实验台上的相机移动台作为动态部件, 由电机驱动滚珠丝杆带动相机平台在 x 方向进行移动, 并通过光栅尺得到 x 方向坐标值。由于圆度评定只需确定截面轮廓信息, 即确定 x 坐标下的 yo 信息, 因此本文基于单目视觉进行了确定 x 坐标的三维重构^[11-12]。

曲轴与相机的位置关系如图 4a 所示, 在像素平面中上下边缘点坐标为 (y_i, z_i) , 利用旋转角度重构关联点。图 4b 中 a_1 坐标为 $(x_0, y_i, 0)$, 相对 y 轴方向 180° 点的坐标为 $(x_0, -y_i, 0)$, 单次旋转角度为 θ 。旋转后获取当前视角下二维图像, 原 $a_2(x_0, y_2, z_2)$ 转到 $a_2(x_0, y_2, z_2)$ 位置, 如图 4c 所示。旋转 180° 后可测得完整圆周, 如图 4d 所示。计算重构后的坐标见式 (8)。

$$\begin{aligned} y_i &= y_i' \cos((i-1)\theta) \quad (i=0, 1, \dots, 180/\theta) \\ z_i &= z_i' \sin((i-1)\theta) \quad (i=0, 1, \dots, 180/\theta) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: (y_i, z_i) 为实际位置; (y_i, z_i) 为像素平面位置; i 为旋转次数; θ 为单次旋转角度。

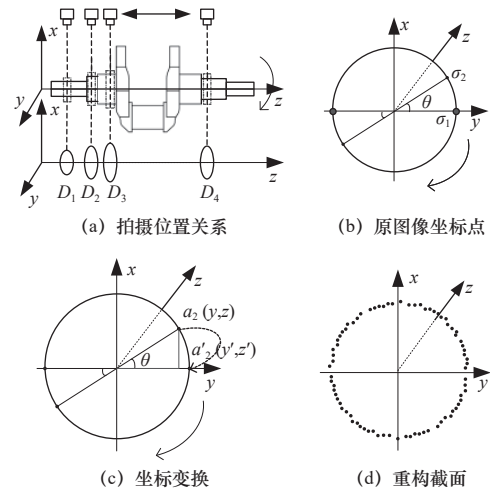


图 4 三维重构示意图

3 圆度评定模型

3.1 圆度评定模型

圆度偏差评价模型可以描述为一对同心圆的‘N+M’特征点形式, 即外圆 N 个点, 内圆 M 个点, 所有测点均位于两个同心圆之间^[13]。

本文利用改进的凸包算法对最小外接圆 (minimum circumscribed circle, MCC) 和最大内接圆 (maximum inscribed circle, MIC) 特征点快速定位, 然后依据四点交叉原则确定最小包容区域圆 (minimum zone circle, MZC) 的圆心, 算法流程如图 5 所示。

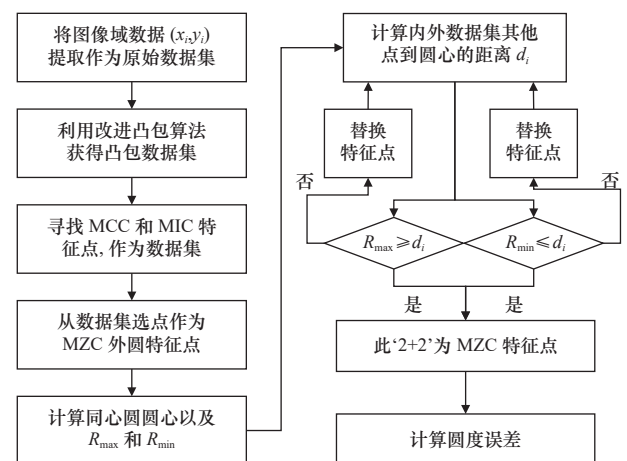


图 5 圆度误差评定算法流程图

3.2 MCC 和 MIC 特征点定位

圆度误差评定方法所采集的数据大多均匀分布于圆周, 本文采用改进的 Graham 扫描法获取圆周点集的凸包, 无需进行坐标变换和极角计算, 凸包集生成示意图如图 6 所示。

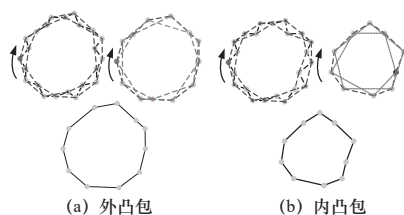


图6 凸包集生成示意图

凸包集生成步骤如下:

(1) 选取 x 值或 y 值在所有数据点中为极限的点为起始点。按照数据采集方向 (顺时针) 在所有数据点连续 3 个点之间判断中间点几何位置, 即 $GPIP$ (geometric position of intermediate point)。

$$GPIP = (y_1 - y_3)(x_2 - x_1) - (x_1 - x_3)(y_2 - y_1) \quad (9)$$

若 $GPIP > 0$, 移除其中间点, 直到 $GPIP > 0$ 的所有点被移除, 此时数据点集为外凸包集。

(2) 按照数据采集方向 (顺时针) 在所有数据点连续 3 点之间判断中间点几何位置, 循环一周后计算 $GPIP > 0$ 的点数量 N , 若 $N \geq 3$, 则移除 $GPIP < 0$ 的点直到 $N > 3$ 时循环结束, 此时数据点集为内凸包集。

特征点的定位步骤如下:

(1) 对凸包集中连续 3 点计算通过这些点的圆的半径, 找到半径值最大的 3 个点, 移除其中间点, 循环操作最后所剩 3 点即为 MCC 特征点。假设连续 3 点的坐标为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 和 (x_3, y_3) , 其圆心求解见式 (10)。

$$\begin{aligned} c_x &= \frac{a(cc' + bb') - b(dd' + aa')}{2(ce - be')} \\ c_y &= \frac{c(dd' + aa') - d(cc' + bb')}{2(ce - be')} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} a &= y_3 - y_1, a' = y_3 + y_1, b = y_2 - y_1, b' = y_2 + y_1 \\ c &= x_2 - x_1, c' = x_2 + x_1, d = x_3 - x_1, d' = x_3 + x_1 \\ e &= y_3 - y_2, e' = x_3 - x_2 \end{aligned}$$

(2) 在内凸包集中每 3 个连续的点, 计算通过这些点的圆的半径, 找到半径最小圆的 3 个点, 然后从中移除其中点, 循环计算直到剩余 3 个点为止, 并记圆心为 c_1 , 半径为 r_1 。

(3) 计算内凸包集其余点到 c_1 的距离记为 d_i , 若 $d_i < c_1$, 则组成新三点。将新获得的 3 个点集重复步骤 2 的计算, 直到 $d_i > c_1$ 停止, 此时的 3 点为 MIC 特征点。

3.3 MZC 圆度误差评定

由 MCC 和 MIC 特征点中分别选两点为 A 、 B 和 C 、 D 构造同心圆, 计算其圆心以及内外圆半径,

并比较其他数据点到圆心的距离 d_i 。若存在 $d_i > R_{\max}$, 选用该点代替 A 、 B 中的一点, 或 $d_i < R_{\min}$, 选用该点代替 C 、 D 中的一点, 并回溯判断过程, 直到 $R_{\max} \geq d_i$ 且 $R_{\min} \leq d_i$, 此时的 4 点即为 MZC '2+2' 模型^[14]的特征点。

圆心坐标计算公式见式 (11):

$$\begin{bmatrix} x_o \\ y_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_A - x_B & y_A - y_B \\ x_C - x_D & y_C - y_D \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} 0.5(x_A^2 - x_B^2 + y_A^2 - y_B^2) \\ 0.5(x_C^2 - x_D^2 + y_C^2 - y_D^2) \end{bmatrix}$$

$$R_{\max} = \sqrt{(x_{A/B} - x_o)^2 + (y_{A/B} - y_o)^2}$$

$$R_{\min} = \sqrt{(x_{C/D} - x_o)^2 + (y_{C/D} - y_o)^2} \quad (11)$$

最小包容区域法圆度误差见式 (12), 示意图如图 7 所示。

$$e_{MZC} = R_{\max} - R_{\min} \quad (12)$$

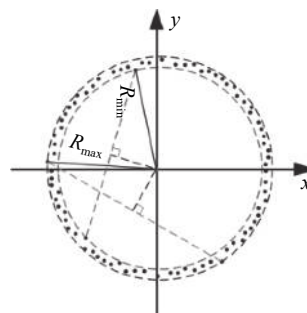


图7 圆度误差评定示意图

4 仿真及实验分析

4.1 圆度评定仿真验证

为了验证圆度评定模型的准确性, 通过文献 [15] 数据 a 的和文献 [16] 数据 b 对本文提出的基于计算几何的 MZC 圆度评定方法进行数值仿真验证。数据处理结果如图 8 所示, 各项计算值对比见表 1。

从表 1 可以看出, 本文评定方法所得到的圆度误差结果与文献 [13] 和文献 [14] 基本一致, 证明本方法可以准确地进行圆度误差评定。

4.2 视觉圆度评定实验分析

在机器视觉实验台^[17]上进行了 170F 平键曲轴的圆度误差评定测试, 实验采用 MER-2000-19U3C 型工业相机, 像素为 5496×3672 , 镜头型号为 V1228-MPY2, 焦距 $f=12$ mm, 实验平台来自张伟老师实验室, 如图 9 所示。在检测过程中, 曲轴做固定增量旋转运动, 同时相机水平移动。本文所针对的检测对象形状较复杂, 因此选取了曲轴的重要截面 D_1 、 D_2 、 D_3 , 之后分别检测曲轴 3 个截面处圆度误差, 测量数据为 20 次测试的均值, 见表 2。

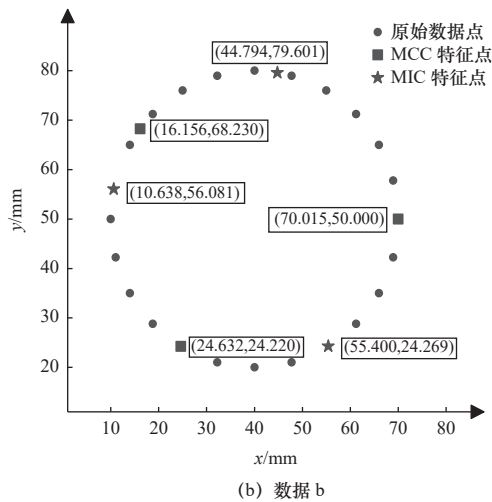
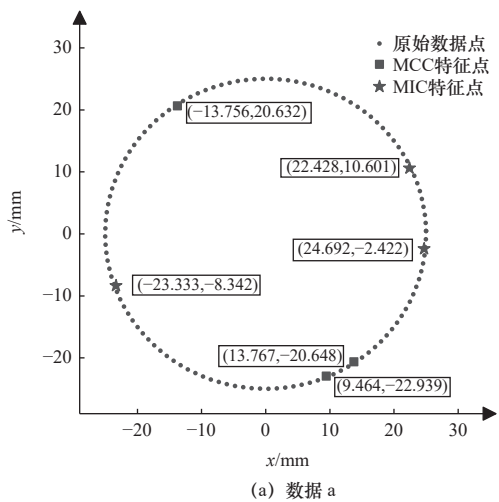


图 8 数据处理结果

表 1 仿真对比

数据	评定方法	圆心坐标 计算值/mm	圆度误差 计算值/ μm
数据 a	文献[13]MCC	$x=14.640$ $y=-1.523$	14.68
	文献[13]MIC	$x=16.421$ $y=-2.435$	15.06
	本文方法	$x=15.507$ $y=-2.374$	14.23
数据 b	文献[14]MZC	$x=40.001$ $y=40.002$	29.29
	本文方法	$x=40.001$ $y=50.002$	29.28

在此次研究中，以三坐标测量机对曲轴圆度误差进行测量并将结果作为标准值，对本文所提出的方法进行比较验证。三坐标测量机如图 10 所示。实验用 HEXAGON 三坐标测量机对 D_1 、 D_2 、 D_3 这 3 个截面进行了圆度对比测量，坐标定位精度优于 $10\text{ }\mu\text{m}$ ，行程范围 $800\text{ mm}\times 1\text{ }200\text{ mm}\times 600\text{ mm}$ 。

从表 2 可以看出，在单拐曲轴圆度误差评定测

试中，本文视觉评定结果略高于三坐标测量机评定结果，误差范围为 $3\sim 4\text{ }\mu\text{m}$ ，3 个不同位置的 20 次测量的绝对误差均值为 $3.4\text{ }\mu\text{m}$ ，证明本文方法有较高的准确度，可以应用于曲轴的圆度评定工作。

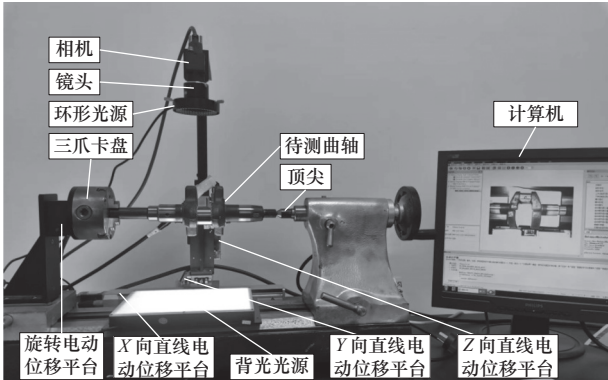


图 9 实验台示意图

表 2 数据对比

测量位置	轴径/mm	视觉圆度 评定/ μm	CMM圆度 评定/ μm	绝对误差/ μm
D_1	19.00	17.3	14.2	3.1
D_2	25.00	18.2	15.0	3.2
D_3	30.00	20.1	16.2	3.9
误差均值				3.4

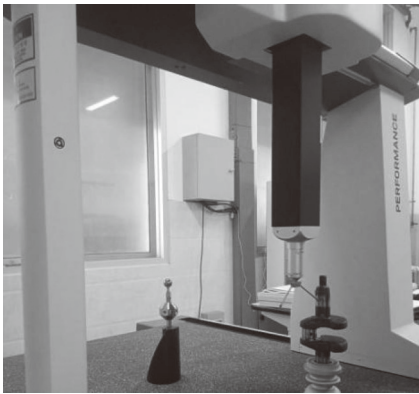


图 10 CMM 圆度误差测量

5 结语

本文提出了一种基于凸包算法的曲轴圆度误差视觉测量方法，侧重于非接触测量，通过对曲轴的数字图像重构以获取曲轴截面圆周离散点，以改进的计算几何算法与基本数学运算完成曲轴圆度误差的在线评定。

研究结论如下：

(1) 本文应用改进的计算几何算法与基本数

学运算求解基于 MZC 圆度误差, 减少了最优法的收敛问题, 降低了大量迭代的计算误差。

(2) 评定测试结果显示, 本文方法与微米级测量精度的 CMM 测量结果相比误差均值为 $3.4\ \mu\text{m}$, 测量精度高。

(3) 本文所提出的曲轴圆度误差视觉评定系统具有较高的准确度, 可应用于高精度曲轴的圆度评定工作。

在后续针对曲轴视觉评定的研究工作中, 笔者将进一步研究曲轴直线度等其他几何特征的在线评定方法, 为曲轴高精度视觉评定提供可行的参考方案。

参 考 文 献

- [1] Parthiban M, Harinath M, Kirubakaran M. Measurement of roundness on the bearing by varying probe length in CMM[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 42: 1393-1403.
- [2] Jiang B C, Du X, Bian S L, et al. Roundness error evaluation in image domain based on an improved bee colony algorithm[J]. *Mechanical Sciences*, 2022, 13(1): 577-584.
- [3] 张春阳, 雷贤卿, 李济顺, 等. 基于几何优化的圆度误差评定算法[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(12): 8-12.
- [4] Kshaurad K, Kiran M B, Shanmuganatan S P. Minimum zone tolerance algorithm to detect roundness error for machined rods using vision system[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46: 5997-6003.
- [5] Du C L, Luo C X, Han Z T, et al. Applying particle swarm optimization algorithm to roundness error evaluation based on minimum zone circle[J]. *Measurement*, 2014, 52: 12-21.
- [6] 金守峰, 焦航. 基于机器视觉的钢领内圈圆度检测方法[J]. *毛纺科技*, 2022, 50(4): 83-88.
- [7] 迟德霞, 王洋, 宁立群, 等. 张正友法的摄像机标定试验[J]. *中国农机化学报*, 2015, 36(2): 287-289, 337.
- [8] 王富治, 黄大贵. 基于图像差分的精密畸变校正研究[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(2): 377-382.
- [9] 逯海滨, 张丹, 李长安, 等. 基于机器视觉的直齿轮齿距偏差检测[J]. *制造技术与机床*, 2023(1): 126-131.
- [10] 徐从裕, 徐俊, 高雨婷, 等. 面向在线测量的亚像素提取与实验验证[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(8): 23-29.
- [11] 盛精, 王志敏, 易了, 等. 一种基于等效平面磨损区的立铣刀底刃磨损评价方法[J]. *制造技术与机床*, 2021(10): 90-96.
- [12] Wang Y, Jin C Y, Zhang Y H. Pipe defect detection and reconstruction based on 3D points acquired by the circular structured light vision[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013(5): 1-7.
- [13] Liu F, Xu G H, Liang L, et al. Minimum circumscribed circle and maximum inscribed circle of roundness deviation evaluation with intersecting chord method[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 65(12): 2787-2796.
- [14] Li X M, Shi Z Y. Development and application of convex hull in the assessment of roundness error[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(1): 135-139.
- [15] Samuel G L, Shunmugam M S. Evaluation of circularity from coordinate and form data using computational geometric techniques[J]. *Precision Engineering*, 2000, 24(3): 251-263.
- [16] Singh D, Arunachalam N, Srinivasu D S. A novel iterative-based field search technique for roundness evaluation[J]. *Procedia Manufacturing*, 2021, 53: 268-275.
- [17] 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.

第一作者/通信作者: 曹颖, 男, 1973 年生, 高级工程师, 主要研究方向为机械产品检测。E-mail: 1726827991@qq.com

(编辑 李 静)

(收修改稿日期: 2023-05-11)

文章编号: 20230826

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。