

基于机器视觉的小尺寸外螺纹关键参数检测方法^{*}

代国成^① 罗 哉^① 江文松^① 位恒政^②

(^①中国计量大学计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018; ^②中国计量科学研究院, 北京 100029)

摘 要: 针对小尺寸外螺纹测量难题, 提出一种基于机器视觉的螺纹关键参数测量方法, 获取外螺纹牙型边缘的精确信息, 解决了扫描探针针尖过大无法测量小尺寸螺纹的问题。首先通过中值滤波进行预处理, 去除图像中包含的椒盐噪声和脉冲干扰, 并利用 Otsu 选取最佳阈值对图像二值化。通过改进的高斯滤波和自适应阈值 Canny 算子提取螺纹的轮廓边缘。同时设计了测量区域的最小矩形拟合算法对螺纹图像进行倾角校正。最后通过最小二乘法直线拟合计算螺纹的尺寸参数。实验结果表明, 螺纹的螺距、中径的测量精度达到 0.001 4 mm 和 0.002 7 mm, 实现了螺纹关键参数的高精度测量。

关键词: 螺纹测量; 机器视觉; 算法研究; Canny 算子; 相机标定; 最小二乘法

中图分类号: TG85, TH161

文献标识码: A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.08.023

Detection method of key parameters of small external thread based on machine vision

DAI Guocheng^①, LUO Zai^①, JIANG Wensong^①, WEI Hengzheng^②

(^①College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, CHN;

^②National Institute of Metrology, Beijing 100029, CHN)

Abstract: Aiming at the difficult problem of measuring small size external threads, a method for measuring key parameters of threads based on machine vision was proposed to obtain accurate information about the edge of the external thread profile, which solved the problem that the scanning probe tip was too large to measure small size threads. Firstly, a median filter was used for preprocessing to remove salt and pepper noise and pulse interference contained in the image, and Otsu was used to select the optimal threshold value to binarize the image. An improved Gaussian filter and adaptive threshold canny operator were used to extract the contour edge of the thread. At the same time, a minimum rectangle fitting algorithm for the measurement area was designed to correct the inclination angle of the screw image. Finally, the least square linear fitting method was used to calculate the dimension parameters of the thread. The experimental results showed that the measuring accuracy of the screw pitch and the middle diameter of the thread reached 0.001 4 mm and 0.002 7 mm, which realized the high precision measurement of the key parameters of the thread.

Keywords: thread measurement; machine vision; algorithm research; Canny operator; camera calibration; least square method

检测技术是现代制造与加工的基础技术^[1], 是保证产品质量和加工精度的关键。随着工业生产水平自动化技术的提高和精密机械的发展, 不仅要求螺纹联接可靠, 而且要求联接部件间具有较高的配合精度^[2]。传统的接触式测量, 如环规塞规只能判断出被检螺纹是否合格, 但不能得到各项具体参数。

此外, 综合检测方法还具有成本高、磨损大和人为误差大等影响因素^[3]。

近几年随着传感器和计算机的快速发展, 基于数字图像处理技术的测量方法以其非接触性、高精度和高速检测等特点在螺纹检测中得到了广泛的应用^[4-5]。目前国内外一些专家学者对螺纹测量方法

^{*} 质量技术基础能力建设专项项目 (ANL2012); 中国计量科学研究院基本科研业务费 (24-AKYS1601)



进行了研究。例如, Gadelmawla E S 等^[6]开发了一种高级轮廓测量的基于新型滚珠丝杠的几何参数动态测量系统; Feng H T 等^[7]采用光幕测量方法提取螺纹边缘信息并进行数据分区计算, 与传统方法相比能够满足所需的测量精度并且不受待测件尺寸限制; Huang H L 等^[8]针对滚珠丝杠的螺纹牙型, 基于激光测量理论, 开发了一种新的基于激光的螺纹牙型测量系统; Chen S 等^[9]补偿系统误差, 解决了螺纹扫描仪测量中径时的偏差; 李保章等^[10]为了进一步改善轮廓提取效果, 改进了 Zernike 矩亚像素边缘提取算法, 提高了亚像素边缘点的定位精度。

针对小尺寸螺距的螺纹测量难题, 设计了一种基于机器视觉的外螺纹关键参数检测方法, 搭建了视觉检测平台, 通过使用改进型的高斯滤波和自适应 Canny 算子边缘检测, 并结合阈值分割算法得到精确的螺纹轮廓信息。

1 螺纹视觉测量系统

螺纹参数检测系统主要由硬件和软件两部分组成, 如图 1 所示。硬件部分主要包括 CMOS 图像传感器、工业镜头、LED 光源、光源控制器、载物平台和计算机; 软件部分由系统控制、相机标定、图像处理、参数计算和显示页面组成。

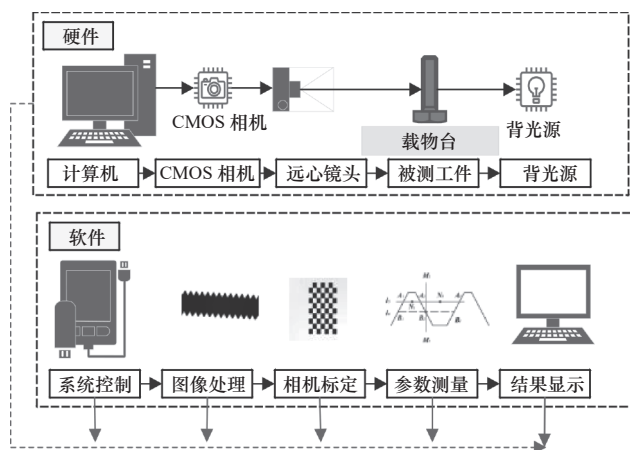


图 1 螺纹参数检测系统组成

2 软件系统功能实现

软件系统主要包括系统控制、图像处理、相机标定和参数测量等模块, 其中图像处理模块主要包括图像的预处理和阈值分割, 改进的高斯滤波和自适应 Canny 算子边缘检测部分。

2.1 图像预处理和阈值分割

在采集螺纹图像的过程中, 由于 CMOS 感光元件自身存在的影响和外界环境的干扰, 图像不可避免地引入噪声。首先对图像进行预处理, 采用中值滤波处理图像中所包含的椒盐噪声和脉冲干扰, 中值滤波在去除噪声同时对图像的边缘信息有一定的保护性^[11]。通过滤波处理后, 对图像二值化从而分割出目标区域。本文采用最大类间方差法进行分割, 设获取到的图像像素为 N , 灰度级为 $L(0, 1, 2, \dots, L-1)$, 灰度值为 i 的像素值个数为 n_i , 各个灰度值的概率为 $p_i = n_i/N$, 存在一最佳阈值 t 将所有像素分为两类 C_0 和 C_1 , 则 C_0 和 C_1 的灰度值分别为 $(0, 1, 2, \dots, t)$ 和 $(t+1, t+2, \dots, L-1)$, 产生的概率分别为

$$\omega_0 = \frac{\sum_{i=0}^t n_i}{N} = \sum_{i=0}^t p_i \quad (1)$$

$$\omega_1 = \frac{\sum_{i=t+1}^{L-1} n_i}{N} = \sum_{i=t+1}^{L-1} p_i = 1 - \omega_0 \quad (2)$$

C_0 和 C_1 的平均灰度值为

$$\mu_0 = \frac{\sum_{i=0}^t p_i \times i}{\omega_0}, \quad \mu_1 = \frac{\sum_{i=t+1}^{L-1} p_i \times i}{\omega_1} \quad (3)$$

梯度图像整体的平均灰度值为

$$\mu = \sum_{i=0}^{L-1} p_i \times i \quad (4)$$

根据方差的概念, 类间方差表达式为

$$\sigma^2 = \omega_0(\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu)^2 \quad (5)$$

计算类间方差最大时的最佳阈值 t , 通过该最佳阈值对平滑后的图像进行二值化, 预处理和二值化结果如图 2 所示, 中值滤波有效滤除图像中包含的噪声信息, 在保留拐角细节特征的同时对噪声抑制效果理想。二值化后螺纹边缘与背景差异明显。

2.2 改进的高斯滤波和自适应阈值 Canny 算子

高斯滤波为低通滤波器, 其本质为滤波后每一点的像素值由模板权值大小和领域范围内的像素加权平均代替。本文采用两次一维高斯滤波代替二维高斯滤波, 当模板和图像尺寸较大时, 快速高斯滤波处理更高效。传统高斯滤波在去除噪声信号的同时, 仅仅是欧式距离进行滤波, 从而导致图像模糊, 原因为以 q 为中心的窗口中, 某一点 p 在滤波过程中权重计算方式如下:

$$G(p) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(p-q)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

式中： σ 为高斯函数的标准差。本文在高斯滤波的基础上增加像素值权重项，既考虑像素值差异的影响，也考虑距离因素，像素值越相近，权重越大，将像素权重表示为 G_r ，空间距离权重表示为 G_s ，像素权重和空间距离权重如下：

$$G_s = \exp\left(-\frac{\|p-q\|^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (7)$$

$$G_r = \exp\left(-\frac{\|I_p - I_q\|^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (8)$$

改进型的高斯滤波结果为

$$BF = \frac{1}{W_q} \sum_{p \in S} G_s(p) G_r(p) * I_p$$

$$= \frac{1}{W_q} \sum_{p \in S} \exp\left(-\frac{\|p-q\|^2}{2\sigma_s^2}\right) \exp\left(-\frac{\|I_p - I_q\|^2}{2\sigma_r^2}\right) * I_p \quad (9)$$

式中： W_q 为滤波窗口内每个像素值的权重值，用于权重的归一化。

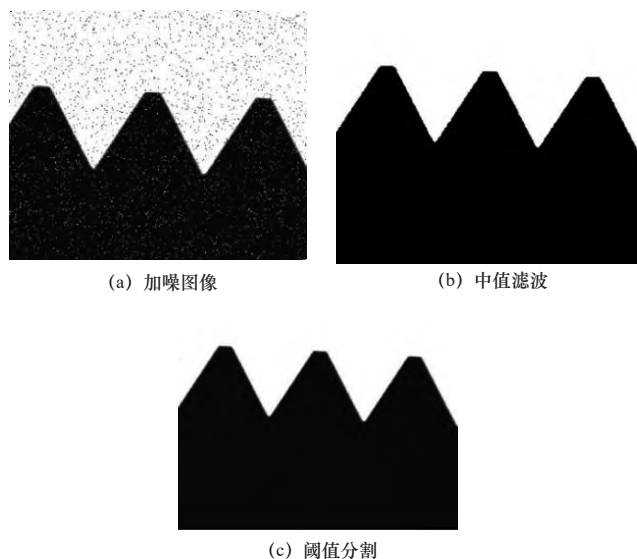


图2 螺纹图像预处理和阈值分割

传统的 Canny 算子仅计算 2×2 领域内的 x, y 方向上的梯度，容易出现边缘丢失的情况，本文将传统的 2×2 领域改为 3×3 ，在原有的 x, y 方向上补充 45° 和 135° 方向，分别计算各个方向上的梯度向量，最终像素点的幅值和梯度方向角由式 (9) 和式 (10) 得到。

$$G = \sqrt{\sum_{i=1}^4 G_i^2(x, y)} \quad (10)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{|G_y|}{|G_x|}\right) \quad (11)$$

式中： i 分别为 $x, y, 45^\circ, 135^\circ$ 。在确定高低阈值时候，传统方法一般采用图像灰度图的平均值，本文采用基于 Otsu 的最大类间方差实现阈值的自适应选择，设存在高低阈值分别为 T_H 和 T_L ，将图像分为非边缘点梯度幅值集合 C_1 ，候选点梯度幅值集合 C_2 ，边缘点梯度幅值集合 C_3 三部分，通过最大类间方差法得出。

$$\sigma = p_1 u_1^2 + p_2 u_2^2 + p_3 u_3^2 \quad (12)$$

式中： p_1, p_2, p_3 分别为三部分的灰度概率； u_1, u_2, u_3 为灰度均值；当方差取得最大值时，所得的 T_H 和 T_L 为改进型 Canny 算子的高低阈值。与传统 Canny 算子检测边缘效果对比，改进的算法错误率低，定位精度高且不易产生伪边缘，如图 3 所示。

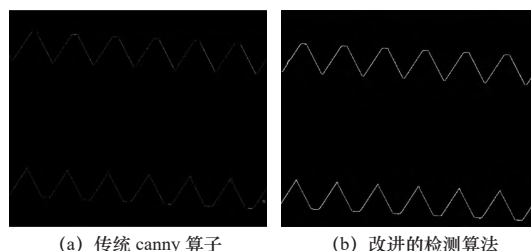


图3 改进算法拟合后的轮廓

2.3 图像倾角校正

采集得到的螺纹图像往往会出现一定的倾斜，给后续的参数计算带来一定的困难。因此，在图像的预处理阶段，需要先对目标图像进行倾角校正^[12]。利用最小外接矩形函数求出轮廓曲线的最小外接矩形，通过外接矩形一侧的两顶点 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 所形成的边和水平线构成连线夹角，求得其倾斜角度 $\theta = \arctan((y_2 - y_1)/(x_2 - x_1))$ 。为了得到旋转后的新坐标，设待旋转坐标为 (u_x, u_y) ，以矩形的中心坐标 $C(x_0, y_0)$ 为中心。构建的仿射变换如下：

$$\begin{bmatrix} u'_x \\ u'_y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中： (u_x, u_y) 为变换前原始图像中的像素坐标； (u'_x, u'_y) 为仿射变换后对应的坐标；计算倾角校正后方便后续计算螺纹的几何参数。

2.4 螺纹尺寸测量

2.4.1 大径小径螺距测量

最小二乘法是利用数理统计中的回归分析，来确定两种变量间相互依赖的定量关系^[13]。边缘检测

后提取螺纹参数的轮廓点,寻找局部极值后剔除部分干扰点后得到大径和小径的数据点集;通过最小二乘法分别对数据点集进行数据拟合,拟合直线的数学表达式为 $Ax+By+C=0$,拟合后上下两条大径的直线参数分别为 $L_1: A_1=0, B_1=-1, C_1=1\ 268$ 和 $L_2: A_2=0, B_2=-1, C_2=542.1$ 。理论上 L_1, L_2 为两条平行直线,通过求取点到直线的距离方法得到螺纹的大径值。在 L_1 上任取10点,求到直线 L_2 距离的平均值,在 L_2 上任取10点,求到直线 L_1 距离的平均值,按照式(13)可得到大径的测量值,如图4所示。

$$D = \frac{1}{20} \left[\sum_{i=1}^{10} \left| \frac{A_1 x_i + B_1 y_i + C_1}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2}} \right| + \dots + \sum_{i=10}^{20} \left| \frac{A_2 x_i + B_2 y_i + C_2}{\sqrt{A_2^2 + B_2^2}} \right| \right] \quad (14)$$

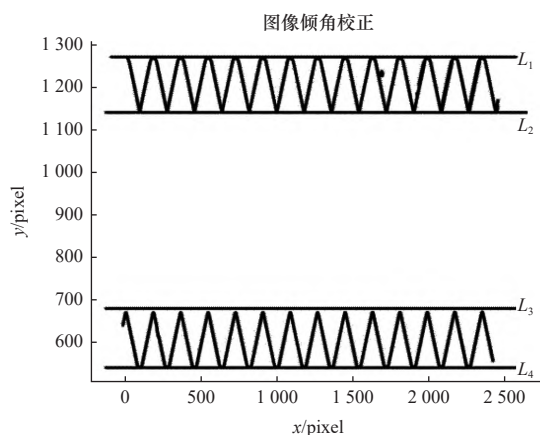


图4 大径小径测量

同理,小径的拟合直线分别为 L_3 和 L_4 ,通过公式可计算小径 d 的测量值。计算完大径时, L_1 与螺纹牙侧交点之间距离为螺距 P 的一半,计算所有相邻点之间距离的平均值再乘以2,即可得到螺距 P 。

2.4.2 螺纹中径测量

中径定义为一个假想圆柱或者圆锥的直径,该圆柱或圆锥的母线通过牙型沟槽和凸起宽度相等的地方。本文通过平面上两条直线相交并利用定等分比的方法确定交点的位置从而推导出中径的位置。在图像上绘制一条与螺纹轴线平行的直线 l_5 ,与螺纹牙的边缘线相交于点 A_1, A_2, A_3 螺纹牙侧是经过直线拟合后得到的,由交点公式可求出 A_1, A_2, A_3 的坐标,随后求出线段 $A_1 A_2$ 的中点 N_1, N_2 ,求出 N_1, N_2 的直线方程,然后求取线段 $N_1 N_2$ 的垂直平分线 $M_1 M_2$,直线 $M_1 M_2$ 与螺纹牙侧边相交于 B_2 ,过点 B_2 绘制一条与螺纹轴线平行的直线 l_2 交螺纹牙侧边于 B_1, B_3 ,则线段 $B_1 B_2 = B_2 B_3$,即螺纹牙上沟槽和凸起宽度相等的地方,直线为 l_2 中径假想圆柱体的母线。

求螺纹中心点到直线距离的平均值,可以得到中径的测量值,如图5所示。

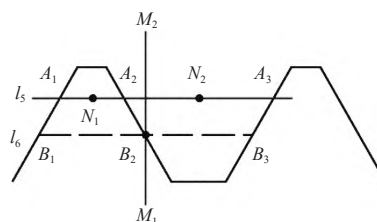


图5 中径计算

3 实验与结果分析

实验装置采用Basler acA32440相机,感光芯片尺寸为2/3英寸,水平垂直分辨率为2448×2048px,镜头选择OPTO ENGINEERING的TCLWD250远心镜头搭配使用,其焦距为20mm。采用OPTO ENGINEERING的LTCLHP016-G光源,光源颜色为绿色,峰值波长为525nm,光谱半高宽为40nm。光源电压为12~24V,最大功耗为2.5W。经实验验证,该系统采用绿色光源时图像的抗干扰能力强,稳定性好,同时采集的螺纹图像具有高对比度,能够获得螺纹的清晰轮廓。搭建好的实验平台如图6所示。

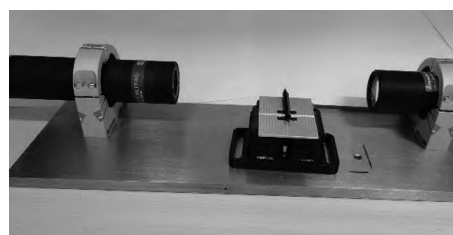


图6 视觉检测系统总体结构

首先对相机进行标定。采用光学玻璃棋盘格标定板,图7通过拍摄标定板不同位姿的9幅标定图像,根据平面标定法通过闭合解法求得相机的内外参数,标定板为10×7棋盘格,每个方格边长为0.23mm。

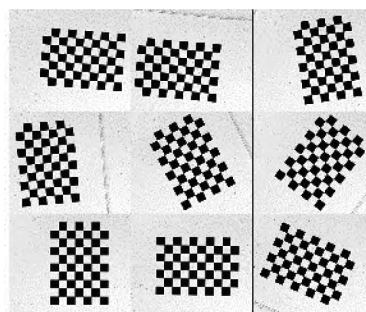


图7 标定板的摆放位置

根据螺纹参数视觉测量系统对螺纹进行测量实验,测量螺纹工件的大径、中径和小径参数,每个螺纹参数测量10次并记录其测量结果,见表1。

表1 螺纹几何参数测量结果 mm

检测序号	大径	中径	小径	螺距
1	1.001 2	0.845 5	0.652 1	0.249 5
2	1.001 4	0.840 7	0.649 7	0.248 7
3	0.998 7	0.843 2	0.652 3	0.250 6
4	0.999 6	0.840 5	0.651 7	0.250 3
5	1.000 7	0.845 4	0.653 1	0.248 7
6	1.000 4	0.842 5	0.648 9	0.249 8
7	0.998 1	0.845 2	0.649 2	0.251 3
8	0.999 4	0.841 1	0.650 8	0.249 5
9	1.002 3	0.844 6	0.649 3	0.251 2
10	1.001 8	0.842 1	0.650 8	0.248 9
平均值	1.000 4	0.843 1	0.651 4	0.249 8

为验证设计的视觉非接触式测量系统的检测精度,采用螺纹综合测量仪进行对比检测,检测结果见表2。由表1和表2可以得出,系统的测量精度较高,大径、中径、小径和螺距的测量精度可分别达到0.0034mm、0.0027mm、0.0028mm、0.0014mm。螺纹中径在螺纹配合中起重要作用,为验证实验的检测结果,对检测的中径参数进行误差分析^[14]。首先计算测量结果的算数平均值,公式如下。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{n} \quad (15)$$

表2 螺纹综合测量仪检测结果 mm

检测序号	大径	中径	小径	螺距
1	0.998 9	0.843 0	0.650 3	0.249 9

测量设备的重复性非常重要,重复性之在同一测量条件下,对被测量进行多次测量所得结果的一致性。本文测量次数为10次,在计算标准差 σ 时,采用贝塞尔公式求解:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} v_i^2}{n-1}} \quad (16)$$

经计算,中径测量结果的算数平均值 $\bar{x}=0.843\ 1\ \text{mm}$,测量结果的标准差 σ 为0.001 9 mm,测量系统具有很高的测量精度和极小的标准差。

4 结语

本文针对小尺寸螺距的螺纹测量难题,提出了一种基于机器视觉的外螺纹关键参数测量方法,用于测量螺纹的大径、中径、小径和螺距。通过中值滤波进行预处理,去除图像中的噪声干扰,并利

用Otsu选取最佳阈值对图像二值化。为得到精确的螺纹边缘信息,以改进的高斯滤波和Canny算子提取螺纹的轮廓边缘。同时设计了被测螺纹的最小矩形拟合,通过外接矩形的几何中心,利用仿射变换矩阵和齐次坐标变换对螺纹图像进行倾角校正。最后通过最小二乘法直线拟合轮廓,计算得到螺纹的关键参数。通过对比螺纹综合测量仪的检测结果,中径的测量精度达到0.002 7 mm,测量标准差达到0.001 9 mm,实现了螺纹关键参数的高精度测量。

参 考 文 献

- [1] 刘阳,刘超.基于视觉的非接触外螺纹关键参数测量方法[J].组合机床与自动化加工技术,2021(8):105-108.
- [2] 周策策,李杏华.基于机器视觉的螺纹参量测量系统[J].激光技术,2016,40(5):643-647.
- [3] 徐爱群,项占琴,陈子辰.非接触式自动螺纹检测仪的研制[J].浙江大学学报:工学版,2005(8):1179-1183.
- [4] 包能胜,方海涛.连续运动螺纹尺寸自适应机器视觉检测[J].计量学报,2020,41(9):1062-1069.
- [5] 王可,董祉序,孙兴伟,等.石油钻杆螺纹廓形参数在机测量系统研究[J].仪器仪表学报,2016,37(7):1618-1625.
- [6] Gadelmawla E S. Computer vision algorithms for measurement and inspection of external screw threads[J]. Measurement, 2017, 100: 36-49.
- [7] Feng H T, Wang Y L, Li C M, et al. An automatic measuring method and system using a light curtain for the thread profile of a ballscrew[J]. Measurement Science & Technology, 2011, 22(8): 085106.
- [8] Huang H L, Jywe R Y, Liu R H, et al. Development of a novel laser-based measuring system for the thread profile of ballscrew[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2010, 48(10): 1012-1018.
- [9] Sheng C, Dong B Z, Yong H L. A new compensation method for measurement of thread pitch diameter by profile scanning[J]. Measurement Science Review, 2014, 14(6): 323-330.
- [10] 李保章,崔彦平,李荣廷.视觉测量中基元特征亚像素提取方法的研究[J].河北科技大学学报,2012,33(2):146-149,189.
- [11] 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.
- [12] 钟金荣,杜奇才,刘茨,等.特征提取和匹配的图像倾斜校正[J].中国图象图形学报,2013,18(7):738-745.
- [13] 王少军,刘琦,仲雪洁,等.一种解线性最小二乘问题的FPGA计算方法[J].仪器仪表学报,2012,33(3):701-707.
- [14] 张恒,陈宏亮,战祥鑫,等.大螺纹精密加工及检测技术研究[J].制造技术与机床,2020(3):92-95.

第一作者:代国成,男,1997年生,硕士研究生,研究方向为基于机器视觉的螺纹参数测量。E-mail: 2545381339@qq.com

通信作者:位恒政,男,1978年生,博士,中国计量科学研究院副研究员,研究方向为坐标计量技术和螺纹计量技术。E-mail: weihz@nim.ac.cn

(编辑 高扬)

(收修改稿日期:2023-04-05)

文章编号:20230824

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。