

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2615059

螺纹牙顶线回归修正测量基准大径视觉测量方法^{*}

支 珊¹, 翟健羽¹, 赵今金¹, 杨忠凤²

(1. 辽宁科技学院机械工程学院 本溪 117004; 2. 大连市技师学院模具工程实践中心 大连 116100)

摘 要:针对工业对小螺纹测量基准快速定位与大径测量难点及需求,提出一种螺纹牙顶线回归、修正与评价视觉测量基准算法。采用高斯滤波消除图像噪声,基于双阈值二值法提取螺纹图像边缘过渡带;通过建立图像坐标系,提取特征点初步确定螺纹中心轴线,将中心轴线作为测量基准,构建图像旋转回归模型,第 1 次修正螺纹测量基准;以左螺纹牙顶线为测量基准,采用决定系数量化回归模型拟合优度的统计量,第 2 次修正测量基准;最后,运用修正决定系数评估测量基准定位精度。据此,提出螺纹牙顶图像边缘过渡带信息统计的大径算法,将螺纹牙顶期望边缘投影在 x 轴上,采用大样本数据对螺纹牙顶边缘位置进行统计计算,左、右螺纹期望位置进行螺纹大径计算,并使用标准量块对算法进行标定。通过高精度量块边缘测量进行了算法和测量精度实验验证,实验结果表明:当量块中心轴线与 x 轴具有一定倾斜角度时,采用论文算法测量量块的最大偏差是 0.001 7 mm。分别采用 MV-TOSEDP 高精密自动影像测量仪和 103341 型螺纹测量机,对同一公制螺纹 M2.5 进行了测量实验。当螺纹中心轴线与 x 轴具有一定倾斜角度时,两者测试结果相差 3.1 μm ,最大测量偏差为 8.8 μm ,该算法的平均测量时间是 2.480 1 s。综上,螺纹牙顶线回归修正测量基准大径视觉测量方法能够满足公制小螺纹的快速测量要求。

关键词: 小螺纹;机器视觉;测量基准;螺纹大径;图像处理

中图分类号: TH161 TH741 TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Regression correction of measurement reference for thread crest line based on large-diameter visual measurement

Zhi Shan¹, Zhai Jianyu¹, Zhao Jinjin¹, Yang Zhongfeng²

(1. College of Mechanical Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi 117004, China;
2. Mold Engineering Practice Center, Dalian Technician Institute, Dalian 116100, China)

Abstract: A visual measurement benchmark algorithm for thread crest line regression, correction, and evaluation is proposed to address the challenges of rapid benchmark positioning for small thread and large-diameter measurement in industry applications. Gaussian filtering is used to eliminate image noise, and the edge transition zone of the thread image is extracted based on a dual threshold binary method. An image coordinate system is then established. Feature points are extracted to preliminarily determine the thread center axis, which is used as the measurement reference. An image rotation regression model is constructed to perform the first correction of the thread measurement benchmark. Using the left thread crest line as the measurement benchmark, a statistical measure of the goodness of fit of a quantitative regression model with a coefficient of determination is used to adjust the measurement benchmark for the second time. Finally, the corrected coefficient of determination is used to evaluate the positioning accuracy of the measurement benchmark. On this basis, a major-diameter measurement algorithm is proposed by statistically analyzing edge transition information in thread crest images. The expected edge of the thread crest is projected onto the x -axis, and large-sample statistical data are used to determine the thread crest-edge position. The thread diameter is then calculated at the expected positions of the left and right thread crests, and the algorithm is calibrated using standard gauge blocks. The algorithm and measurement accuracy were experimentally verified through high-precision edge measurement of measuring blocks. The experimental results show that when the center axis of the equivalent block has a certain inclination angle with the x -axis, the maximum deviation obtained using the proposed algorithm is 0.001 7 mm.

收稿日期: 2026-03-22 Received Date: 2026-03-22

^{*} 基金项目: 广东省机器人与智能系统重点实验室开放基金项目(2924040132)资助

Measurement experiments were conducted on the same metric thread, M2.5, using the MV-TOSEDP high-precision automatic image measuring instrument and the 103341 thread measuring machine, respectively. When the central axis of the thread has a certain inclination angle with the x -axis, the difference between the two test results is $3.1\text{ }\mu\text{m}$, and the maximum measurement deviation is $8.8\text{ }\mu\text{m}$. The average measurement time of the proposed algorithm is 2.480 s . In summary, the regression correction measurement method for the thread crest line satisfies the fast measurement requirements of metric small threads based on the visual measurement of the large diameter benchmark.

Keywords: small thread; machine vision; measurement benchmark; thread diameter; image processing

0 引 言

螺纹是机械连接的重要元件。尤其是高精度中小螺纹,广泛应用于精密仪器、微型设备、电子产品、航空航天,以及医疗器械等新兴科技领域。螺纹精度影响连接的紧固性和密封性,直接影响仪器的工作性能、可靠性和使用寿命。高精度、快速检测螺纹,是保证螺纹精度和螺纹制造工艺的关键环节^[1-2]。传统螺纹测量,通常采用三针法、螺距规和千分尺等方法,存在测量精度低、测量速度慢、容易破坏被测件等问题;高精度螺纹测量仪的典型代表是三坐标测量机、激光扫描仪、白光干涉轮廓仪等,这些仪器测量精度高,但是测量速度慢、而且价格昂贵,尤其不能提供螺纹全参数的分析式测量结果^[3-5]。基于机器视觉测量螺纹,具有非接触、精度高、测量速度快、成本低、可以获取实时、分析式在线检测报告等优点^[6-7]。

近年来,不少学者基于机器视觉的螺纹检测开展了广泛研究,江涛等^[8]提出基于轮廓角点检测的视觉测量方法,对螺纹牙底、牙顶的角点进行检测,并且根据检测到的角点测量螺纹大径和小径。李现友^[9]提出基于单目视觉的新边缘检测算子,针对复杂图像背景下,对特定方向直线边缘,进行快速提取,实现多边缘的抽油杆螺纹牙型快速测量。Chen^[10]对公制粗牙螺纹轮廓畸变进行仿真计算,发现螺纹轮廓畸变对大径没有影响,但对小径有一定程度的影响,得出对螺距角和螺距直径影响较大的结论。Li等^[11]开发了基于机器视觉的抽油杆末端螺纹在线尺寸测量系统。通过采集螺纹的高质量图像,提出定制化开发方向边缘检测算法,以实现螺纹左右边缘的精准识别。在螺纹螺距、大径、小径及螺距直径参数测量中,采用方法与万能工具显微镜法的测量结果偏差小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。

基于机器视觉测量螺纹,测量对象多数是中等螺纹和大型螺纹杆^[12-13]。测量时将被测螺纹中心线与螺纹杆夹具中心线同轴,采用夹具定位螺纹测量基准。但是,对于航空零部件来说,特别是需要测量与螺纹轴线相关的位置公差要求时,上述方法并不适用,螺纹轴线的准确测量和提取还需要更加精确^[14-16]。

基于机器视觉测量小螺纹(通常指直径 $d\leq M3$)的

中径参数测量方法极少。主要原因为:1)小螺纹测量时不方便装夹,造成螺纹测量基准难以快速准确定位;2)螺纹牙尺寸微小且形状复杂,为小螺纹参数高精度快速测量造成困难;3)传统螺纹基本尺寸公式无法满足基于视觉测量特点的需求。针对上述问题,本文提出一种螺纹牙顶线回归修正测量基准大径视觉测量方法,可对小螺纹进行快速检测,检测时间可达到每个螺纹 2.5 s 。本文重点介绍小螺纹测量基准修正和大径参数视觉测量方法,并通过实验验证了该测量方法的准确性。

1 螺纹图像预处理

利用工业相机获取被测螺纹灰度图像,如图1所示。



图1 螺纹图像

Fig.1 Thread image

为提高图像质量,消除噪声与干扰,快速定位螺纹边缘过渡带,本文采用高斯滤波和双阈值二值法^[17],提取螺纹图像边缘过渡带,如图2所示。

为保证图像边缘过渡带连续,且尽量减小过渡带的宽度,提高过渡带中心位置的统计精度,减少计算量。论文试验条件下,取双阈值 $g_1=105, g_2=165$ 。

2 螺纹视觉测量基准定位

2.1 螺纹中心轴线视觉测量基准

图像测量基准是确保数字图像处理结果准确性的关键要素。拍摄螺纹时,由于被测小螺纹摆放位姿随机变化,测量基准难以精确定位,导致螺纹测量精度降低等问题。螺纹外轮廓具有中心轴线对称的几何特征,初步采用螺纹中心轴线作为螺纹测量基准,可以简化测量算法,提高螺纹几何参数的测量精度^[18]。

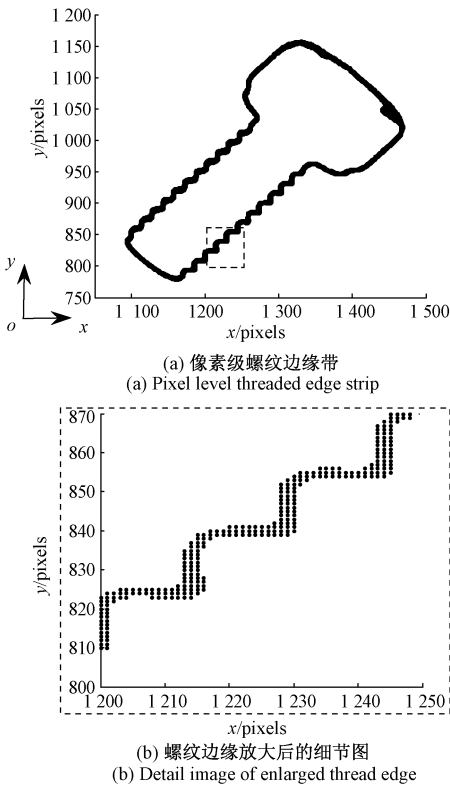


图2 像素级螺纹边缘带提取图像

Fig. 2 Pixel level thread edge extraction image

2.2 基于螺纹中心轴线修正螺纹测量基准算法

根据螺纹几何图像特征和螺纹成型原理,提出基于螺纹中心轴线修正螺纹测量基准算法,通过定位螺纹几何中心和特征点,确定螺纹中心轴线,计算坐标轴与拟合直线夹角,创建回归模型,实现第1次修正螺纹的测量基准。具体过程为:

(1) 初始螺纹中心轴线的确定。被测螺纹具有轴对称性,因此螺纹中心轴线与螺纹牙体截面法向投影的中垂线共线,该中垂线通过螺纹几何中心 $\bar{O}(\bar{x}, \bar{y})$ 与螺纹牙体截面法向投影的中点 $O_0(x_0, y_0)$, 如图3所示。

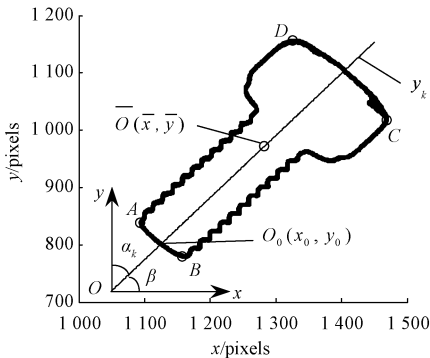


图3 螺纹中心轴线确定过程

Fig. 3 Process diagram for determining the central axis of the thread

螺纹几何中心,如式(1)~(2)所示。

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

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (2)$$

螺纹中心轴线确定过程,如图3所示。

(1) 特征点的确定。初寻螺纹横坐标最小值点 $A(x_{\min}, y_A)$ 和最大值点 $C(x_{\max}, y_c)$, 纵坐标最小值点 $B(x_B, y_{\min})$ 和最大值点 $D(x_D, y_{\max})$;

(2) 螺纹特征点极径的确定。分别计算螺纹几何中心 $\bar{O}(\bar{x}, \bar{y})$ 到关键点 A, B, C, D 的极径 $r_A = \sqrt{(x_{\min} - \bar{x})^2 + (y_A - \bar{y})^2}$, $r_B = \sqrt{(x_B - \bar{x})^2 + (y_{\min} - \bar{y})^2}$, $r_C = \sqrt{(x_{\max} - \bar{x})^2 + (y_c - \bar{y})^2}$, $r_D = \sqrt{(x_D - \bar{x})^2 + (y_{\max} - \bar{y})^2}$;

(3) 建立螺纹中心轴线斜率视觉模型。将极径 r_A, r_B, r_C, r_D , 按照由大到小的顺序的排列, 找到两个最大极径; 最后, 确定螺纹牙体截面法向投影线段的两个端点, 点 A 和 B 。螺纹中心轴线与螺纹牙体截面法向投影的线段 AB 互为垂直, 因此, 螺纹中心轴线斜率 k 的公式为:

$$k = -\frac{x_{\min} - x_B}{y_A - y_{\min}} \quad (3)$$

(4) 建立螺纹中心轴线视觉直线方程。螺纹中心轴线通过螺纹几何中心 $\bar{O}(\bar{x}, \bar{y})$, 由此螺纹中心轴线公式为:

$$y_k = k(x_k - \bar{x}) + \bar{y} \quad (4)$$

即:

$$y_k = -\frac{x_{\min} - x_B}{y_A - y_{\min}} \left(x_k - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \right) + \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

(5) 建立测量坐标系。图像坐标系是以像素为单位的二维直角坐标系, 原点 $O(0, 0)$ 位于图像左下角, 横、纵坐标轴分别是 x 和 y 轴, 螺纹中心轴线与坐标轴的夹角分别是 α_k 和 β , 如图3所示。

(2) 创建螺纹视觉回归模型。为消除螺纹测量的形位误差, 把螺纹中心轴线作为螺纹测量基准, 使中心轴线垂直于 x 轴, 提高螺纹几何参数的测量精度。

以螺纹几何中心 $\bar{O}(\bar{x}, \bar{y})$ 为基准点, 螺纹中心轴线 y_k 为回归线, 螺纹中心轴线 y_k 与 y 轴夹角 α_k 为观察值, 创建螺纹图像旋转回归模型。如式(5)~(7)所示。

$$\alpha_k = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(-\frac{x_{\min} - x_B}{y_A - y_{\min}}\right) \quad (5)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k \cdot \cos \alpha_k - y_i^k \cdot \sin \alpha_k \quad (6)$$

$$y_i^{k+1} = x_i^k \cdot \sin \alpha_k + y_i^k \cdot \cos \alpha_k \quad (7)$$

其中, (x_i^k, y_i^k) 是原图像螺纹边缘点; (x_i^{k+1}, y_i^{k+1}) 是

旋转后的螺纹边缘点。

通过式(5)~(7)计算得到旋转后的螺纹图像,如图4左图所示。通过左螺纹最小横坐标点,作垂直于 x 轴直线 $y=y_{x_{\min}}$,放大后的局部图,如图4右图所示。

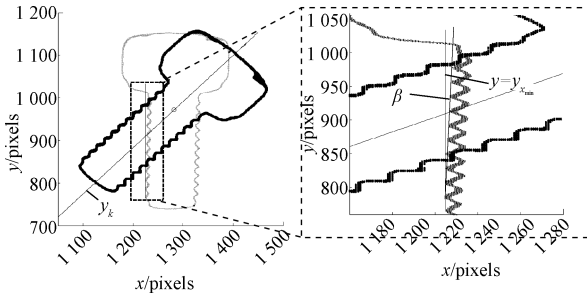
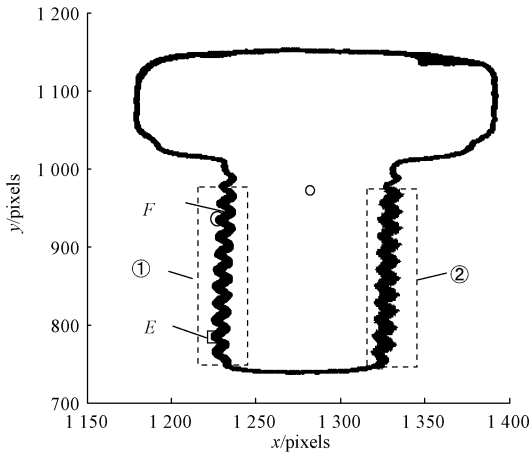


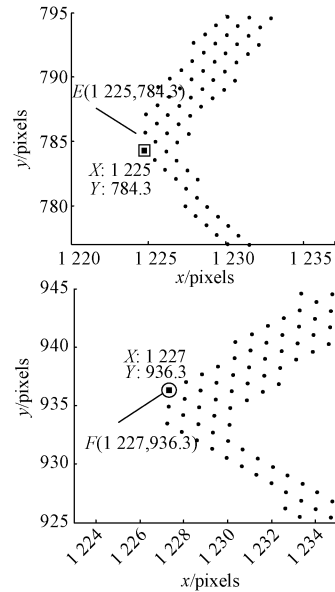
图4 第1次修正测量基准的螺纹图像

Fig. 4 The thread image of the first correction measurement benchmark

图4右图可知,基于螺纹中心轴线修正螺纹测量基准算法,通过建立螺纹图像旋转回归模型,在一定程度上修正了螺纹测量基准,但修正结果存在定位基准误差。因此,提出拟合优度螺纹牙顶线回归修正测量基准方法,解决螺纹中心轴线基准高精度定位问题。



(a) 划分螺纹关注区
(a) Divide the thread attention area



(b) 局部放大图
(b) Local enlarged image

图5 划分螺纹关注区

Fig. 5 Divide the thread attention area

2) 基于左螺纹牙边缘过渡带内特征点修正螺纹测量基准。从图4右图和图5(b)可以看出,随着 y 值不断增大,左螺纹大径边缘点与直线 $y=y_{x_{\min}}$ 的法向距离逐渐增大,存在测量基准偏移角度误差 β 。选取左螺纹大径边缘点第1特征点 E :旋转后左螺纹大径边缘点横坐标最

2.3 拟合优度螺纹牙顶线回归修正测量基准算法

拟合优度与决定系数 R^2 (R-squared)。拟合优度是考察旋转后的左螺纹牙顶边缘过渡带内点拟合直线 $\hat{y} = b_0 + b_1x$ 与直线 $x = x_{\min}$ 的贴合程度。拟合优度有效评估回归模型修正螺纹测量基准的可靠性和预测能力。为获得高精度测量定位基准,对回归模型进一步改进和优化,具体方法为:

1) 划分测量关注区。为了获取旋转后关注区内的螺纹边缘特征点,如图5(a)所示,划分左、右螺纹边缘过渡带,如图5(a)中①和②所示,构建左螺纹边缘过渡带内点集,如式(8)所示。

$$\{(x_i^{k+1}, y_i^{k+1}) \mid x_i^{k+1} < \bar{x}, y_{\min} + a < y_i^{k+1} < \bar{y} - b\} \quad (8)$$

构建右螺纹边缘过渡带内点集,如式(9)所示。

$$\{(x_i^{k+1}, y_i^{k+1}) \mid x_i^{k+1} > \bar{x}, y_{\min} + a < y_i^{k+1} < \bar{y} - b\} \quad (9)$$

式(8)和(9)中, a 和 b 的取值,决定了被测螺纹边缘过渡点的数量。由于螺纹加工时螺纹牙顶端和底部存在加工误差,因此截取适当的配合长度,可以提高测量精度,文中取 $a=10, b=35$ 。

小点 $E(x_{\min}^{k+1}, y_E^{k+1})$,如图5(b)所示;选取左螺纹大径边缘点第2特征点 F :旋转后左螺纹大径边缘点纵坐标最大点 $F(x_F^{k+1}, y_{\max}^{k+1})$,如图5(b)所示。

已知特征点 $E(x_{\min}^{k+1}, y_E^{k+1})$ 和 $F(x_F^{k+1}, y_{\max}^{k+1})$,计算螺纹测量基准偏移角度误差,如式(10)所示。

$$\beta = \arctan\left(\frac{y_{\max}^{k+1} - y_E^{k+1}}{x_F^{k+1} - x_{\min}^{k+1}}\right) \quad (10)$$

将第1次旋转后的螺纹边缘点 (x_i^{k+1}, y_i^{k+1}) 和偏移角度误差 β ,代入式(6)和(7)计算得到旋转后的螺纹图像,如图6(a)所示,放大后的左螺纹大径边缘过渡带内点,如图6(b)所示。

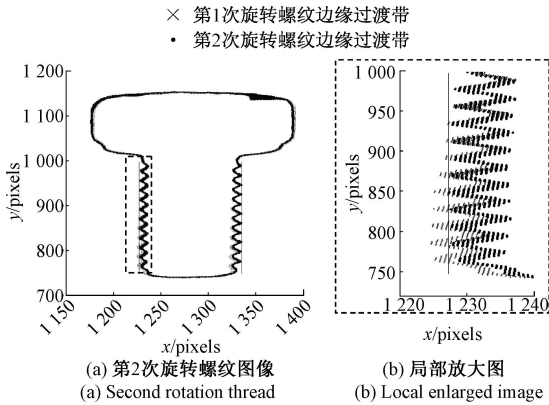


图6 第2次旋转螺纹图像

Fig. 6 Second rotation thread

为获得高精度定位基准,以左螺纹大径边缘过渡带为对象再次划分关注区,如式(11)所示。

$$\{(x_j^{k+1}, y_j^{k+1}) \mid x_{\min}^{k+1} \leq x_j^{k+1} \leq x_{\min}^{k+1} + D\} \quad (11)$$

文中取 $D=1$;划分后的关注区,左螺纹大径边缘过渡带内点,如图7所示。

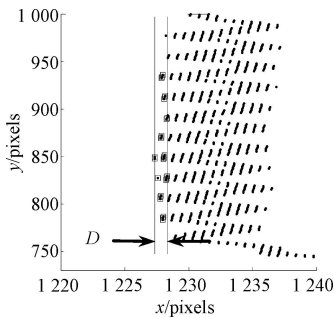


图7 左螺纹大径边缘过渡带关注区

Fig. 7 Left thread large diameter edge transition zone of concern

对关注区的特征点进行线性拟合,建立斜率数学模型,如式(12)~(13)所示。

$$\hat{y}_k = b_0 + b_1 x_k \quad (12)$$

$$b_1 = \frac{n \sum_{j=1}^n x_j^{k+1} \cdot y_j^{k+1} - \sum_{j=1}^n x_j^{k+1} \cdot \sum_{j=1}^n y_j^{k+1}}{n \sum_{j=1}^n (x_j^{k+1})^2 - \left(\sum_{j=1}^n x_j^{k+1}\right)^2} \quad (13)$$

式中: $\hat{y}_k$ 是 y_k 的预测值; b_0 是截距参数的估计值; b_1 是斜率参数的估计值。

为了确保拟合优度修正回归线 $\hat{y}_k$ 视觉定位算法的

正确性,采用决定系数 R^2 量化回归模型拟合优度的统计量,如式(14)所示。

$$R^2 = \cos^2 \gamma \quad (14)$$

$$\text{其中, } \gamma = \frac{\pi}{2} - \arctan(b_1)$$

代入式(13)和(14),计算得到左螺纹统计量和右螺纹统计量分别为: $R_{\text{左}}^2 = 0.9990$ 和 $R_{\text{右}}^2 = 0.9989$;当 R^2 越接近于1,表明预测值越接近样本值,拟合效果越好;设置决定系数 R^2 ,当 $R^2 < 0.95$ 时,则采用最小二乘拟合直线的算法,对被测螺纹进一步修正,并且利用式(11)~(14),评估螺纹测量基准的正确性。

2.4 修正决定系数评估测量基准定位算法

当模型中螺纹升角和 D 取值过大时,螺纹牙顶边缘过渡带内点数量增加。为了惩罚螺纹牙顶期望边缘过拟合,利用修正决定系数 R_{adj}^2 ,修正螺纹牙顶期望边缘的定位精度,如式(15)~(17)所示。

$$R_{\text{adj}}^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-m-1}\right) \cdot \frac{\text{SSE}}{\text{SST}} \quad (15)$$

$$\text{SST} = \sum_{i=1}^n (y_i^k - \bar{y}^k)^2 \quad (16)$$

$$\text{SSE} = \sum_{i=1}^n (y_i^k - \hat{y}_i^k)^2 \quad (17)$$

式中:SST(sum of squares for total)表示总平方和;SSE(sum of squares for error)表示残差平方和; n 表示样本数量; m 表示模型中自变量的数量。

D 值的选取决定了边缘过渡带内点的个数。在修正回归过程中,当 D 取值过小时,螺纹牙顶特征点对测试直线的偏移影响较大;当 D 取值过大时,决定系数 R_{adj}^2 的拟合优度逐步降低,造成螺纹大径边缘过渡带内点的拟合次数不断增加,引发模型过度学习,导致测试直线预测能力下降。因此,利用修正决定系数 R_{adj}^2 ,控制螺纹大径边缘过渡带测试直线 $\hat{y} = b_0 + b_1 x$ 拟合优度,评估测量基准定位精度。

基于拟合优度修正螺纹视觉测量基准算法,获得的螺纹视觉测量图像,如图8所示。

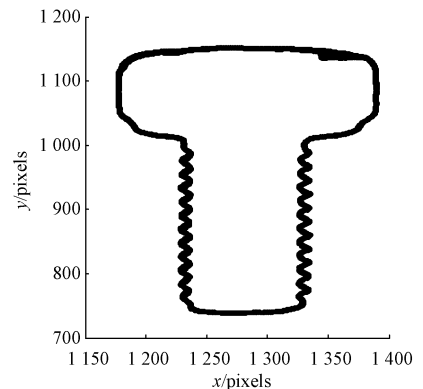


图8 基于拟合优度修正后的螺纹图像

Fig. 8 Thread image corrected based on goodness of fit

3 螺纹大径视觉测量方法

3.1 螺纹牙顶位置的定位算法

论文利用螺纹图像几何特征和螺纹成型原理,将螺纹图像边缘过渡带内像素点作为参数,定位螺纹牙顶位置,建立螺纹关键参数视觉测量模型,实现螺纹测量。

牙顶区域宽度大小,直接影响螺纹牙顶期望边缘的定位精度,决定了螺纹大径测量精度。螺纹牙顶期望边

缘定位算法为:

1) 划分关螺纹注区和分割左、右螺纹牙顶测量区分别为①和②。

(1) 根据式(8)和(9),对图8进行图像划分,得到左、右被测螺纹视觉关注区,如图9(a)所示;(2) 设左、右螺纹牙顶区域宽度阈值分别为 δ_1 和 δ_2 ,采用式(11),以边界轴 $x_i^{k+2} = x_{\min}^{k+2}$ 和 $x_i^{k+2} = x_{\max}^{k+2}$ 为基准,将左、右螺纹牙顶测量区分为 $x_{\min}^{k+2} < x_{\text{左顶}}^{k+2} < x_{\min}^{k+2} + \delta_1$ 和 $x_{\max}^{k+2} - \delta_2 < x_{\text{右顶}}^{k+2} < x_{\max}^{k+2}$ 两个区域,由此完成分割左、右螺纹牙顶测量区域的特征点集,如图9(b)和(c)所示。

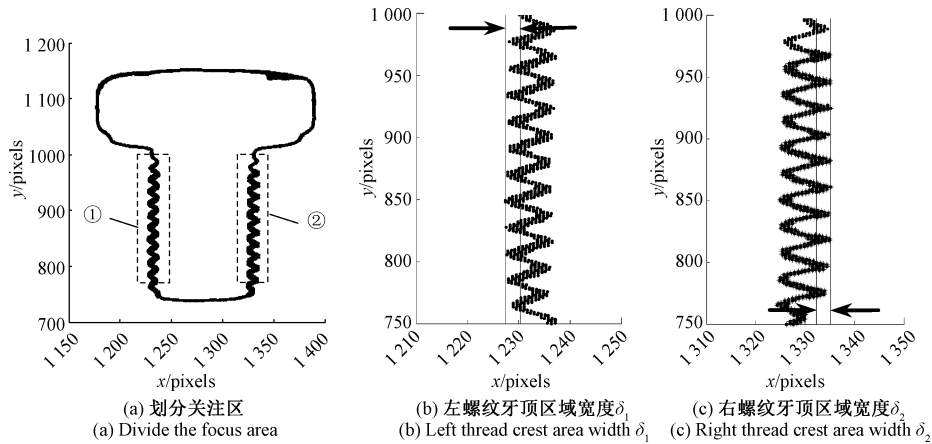


图9 修正后螺纹边缘定位图像

Fig. 9 Corrected thread edge positioning image

2) 螺纹牙顶期望边缘的法向定位。由图9(a)中①可得,分别对左、右螺纹牙顶测量区域 δ_1 和 δ_2 内的特征点集,基于最小二乘法的直线拟合,确定螺纹牙顶期望边缘投影在 x 轴上,即螺纹牙顶期望边缘的法向定位。由于拟合后的直线无限趋近于 y 轴,设直线方程: $x=c_1$ 。对于数据点 $(x_{\text{左顶}}^{k+2}, y_{\text{左顶}}^{k+2})$,使水平方向距离平方和 ε 最小,即:

$$\varepsilon = \min \sum_{i=1}^n (x_{\text{左顶}}^{k+2} - c_1)^2$$

因此,左螺纹牙顶期望边缘的法向定位 $\bar{x}_{\text{左顶}}$:

$$\bar{x}_{\text{左顶}} = c_1 = \frac{1}{u} \sum_{i=1}^n x_{\text{左顶}}^{k+2} \quad (18)$$

同理,右螺纹牙顶期望边缘的法向定位 $\bar{x}_{\text{右顶}}$:

$$\bar{x}_{\text{右顶}} = c_2 = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^n x_{\text{右顶}}^{k+2} \quad (19)$$

其中, u 是左螺纹牙顶区域内的点数; v 是右螺纹牙顶区域内的点数。

不难看出,螺纹视觉测量基准的确定,直接影响 δ_1 和 δ_2 点集的取值范围,是引入测量形位误差的关键因素,对小螺纹的测量精度影响极大。

当 δ_1 和 δ_2 取值较小时,牙顶区域内的点过少,直接

影响螺纹牙顶期望边缘拟合精度;当 δ_1 和 δ_2 取值较大时,牙顶区域内的点过多,将导致螺纹牙顶期望边缘向内漂移,测量螺纹大径时,引入新的测量误差。因此采用均方差根误差评估方法,可以控制 δ_1 和 δ_2 阈值的大小。

3) 基于均方差根误差评估期望边缘拟合质量。通过迭代逼近方法,不断收缩阈值 δ_1 和 δ_2 ,计算左、右螺纹牙顶区域样本均方根误差(root mean square error, RMSE)

$$\text{RMSE}_{\text{左}} = \sqrt{\frac{\text{RSS}_{\text{左}}}{u-1}} \quad (22)$$

$$\text{RMSE}_{\text{右}} = \sqrt{\frac{\text{RSS}_{\text{右}}}{v-1}} \quad (23)$$

其中,RSS(residual sum of squares)是残差平方和,

即 $\text{RSS}_{\text{左}} = \sum_{i=1}^n (x_{\text{左顶}}^{k+2} - c_1)^2$; $\text{RSS}_{\text{右}} = \sum_{i=1}^n (x_{\text{右顶}}^{k+2} - c_2)^2$ 。

RMSE值越小拟合精度越高,表明螺纹牙顶期望边缘越接近螺纹牙顶的真实边缘。通过上述评定方法,确定最终的左、右螺纹牙顶期望定位点和牙顶期望边缘,如图10(a)和(b)所示。

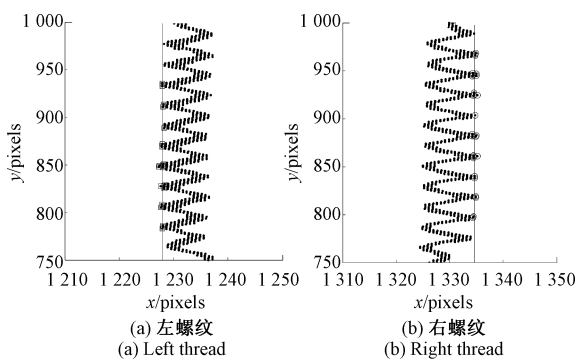


图 10 螺纹牙顶期望定位点和牙顶期望边缘
Fig. 10 Expected positioning point and expected edge of thread crest

3.2 螺纹大径视觉测量模型

基于机器视觉测量外螺纹的大径 d 的方法是:基于左、右螺纹牙顶期望边缘投影在 x 轴上,统计期望位置的 距离差,即外螺纹的最大外径。建立外螺纹的大径视觉 测量模型为:

$$d = c_2 - c_1 \tag{22}$$

即:

$$d = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v x_{\text{右顶}i}^{k+2} - \frac{1}{u} \sum_{i=1}^u x_{\text{左顶}i}^{k+2}$$

其中, c_2 是右螺纹牙顶期望边缘的法向定位; c_1 是左 螺纹牙顶期望边缘的法向定位。

论文提出的螺纹大径视觉测量方法是通过光学放大 螺纹轮廓,定位螺纹牙顶轴线位置,通过左、右螺纹牙顶 投影在 x 轴上的法向距离差,通过计算得到螺纹牙顶直 径。由于光源亮度变化可能对两侧牙顶相对定位精度产 生影响,因此采用标准量块对螺纹定位边缘的精度进行 试验。

4 实验验证

4.1 螺纹边缘定位精度实验

本文提出的螺纹图像边缘定位方法是在确定螺纹视 觉测量基准的前提下,基于灰度双阈值二值法提取螺纹 边缘过渡带图像,再通过最小二乘法进行螺纹牙期望边 缘拟合而得到的统计结果。方法核心是过渡带内各像素 点到螺纹牙期望边缘的法向距离平方和最小。

为了验证螺纹大径测量边缘定位算法的精度,采用 3 mm 的 0 级标准量块进行了实验。拍摄量块不同位姿 的图像,如图 11 所示。

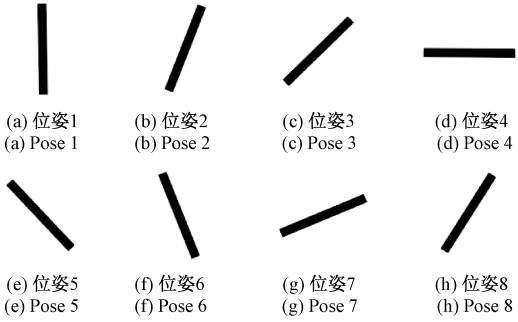


图 11 标准量块的位姿图像
Fig. 11 Position image of standard gauge block

首先采用论文第 2 章基于量块边缘修正测量基准算 法,确定量块测量基准;然后用二值法提取量块两侧直边 的边缘过渡带,截取其中的有效长度,利用论文第 3 章原 理,基于最小二乘法分别拟合成两条直线,确定量块边缘 期望在 x 轴投影的均值点;最后,计算两个投影点的距 离,即量块的测量值。当边缘过渡带的灰度值分别取 $g_1 = 110, g_2 = 160$ 时,测量结果如表 1 所示。

表 1 不同位姿量块的测量尺寸

Table 1 Measurement dimensions of different pose measurement blocks								(mm)
次数	位姿 1	位姿 2	位姿 3	位姿 4	位姿 5	位姿 6	位姿 7	位姿 8
第 1 次	3.001 5	2.999 0	3.001 0	2.999 0	3.001 0	2.999 1	3.000 8	2.998 4
第 2 次	3.001 4	2.999 1	3.001 1	2.999 1	3.001 0	2.999 1	3.000 9	2.998 4
第 3 次	3.001 5	2.999 1	3.001 0	2.999 0	3.001 1	2.999 1	3.000 8	2.998 4
第 4 次	3.001 5	2.999 1	3.001 0	2.999 1	3.001 1	2.999 1	3.000 8	2.998 3
第 5 次	3.001 5	2.999 0	3.001 1	2.999 1	3.001 1	2.999 1	3.000 8	2.998 3
平均值	3.001 5	2.999 1	3.001 0	2.999 1	3.001 1	2.999 1	3.000 8	2.998 4

量块相同位姿 5 次测量的结果,如表 1 所示。表 1 中全部数据的平均值是 3.000 0 mm,最大分散度是 0.003 2 mm,标准差为 0.000 039 mm。试验结果表明,在 采用线性回归修正测量基准视觉算法的基础上,利用二

值法提取量块两侧直边的边缘过渡带内像素点到边缘的 法向距离,进行最小二乘法拟合,测量量块边缘距离的准 确度、精确度和稳定性都很高。

为了验证边缘过渡带宽度对测量结果的影响,在过

饱和条件下,选取 5 种不同的灰度阈值 g_1 和 g_2 进行测量,实验结果如表 2 所示。测量结果的标准差是 0.003 2 mm,最大分散度是 0.020 2 mm。在一定范围内选取灰度阈值 g_1 和 g_2 ,实验结果表明,当量块中心轴线无限趋近于坐标轴(例如:位姿 1 和 4)时,测量偏差较大;当量块与 x 轴具有一定倾斜角度(例如:位姿 2、3、5、6、7 和 8)时,采用论文算法测量量块的最大偏差是 0.001 7 mm。对量块的测量结果影响很小,论文提出的测量方法对光学系统的适应性较强。

表 2 不同灰度阈值的量块测量尺寸

Table 2 Measurement size of measuring blocks with different grayscale thresholds (mm)						
测量位姿	灰度值 90/160	灰度值 90/180	灰度值 120/150	灰度值 110/160	灰度值 120/180	最大偏差
位姿 1	2.991 8	3.002 1	2.999 2	3.001 5	2.991 4	0.010 8
位姿 2	3.000 0	2.999 1	2.999 2	2.999 0	2.999 5	0.000 9
位姿 3	3.000 9	3.001 4	2.999 7	3.001 0	3.000 3	0.001 7
位姿 4	2.988 3	2.999 7	2.997 8	2.999 0	3.008 5	0.020 2
位姿 5	3.002 3	3.000 6	3.001 0	3.001 0	3.000 7	0.001 7
位姿 6	2.999 8	2.998 8	2.999 2	2.999 1	2.999 4	0.001 0
位姿 7	3.001 4	3.000 7	3.000 7	3.000 8	3.001 7	0.001 0
位姿 8	2.998 8	2.998 2	2.998 4	2.998 4	2.998 9	0.000 7

量块测量与螺纹测量都是采用线性回归修正测量基准的视觉定位算法,先将量块与螺纹进行基准定位,当两者测量基准垂直于 x 轴时,再利用最小二乘法拟合,使边缘过渡带上各像素点到期望边缘的法向距离平方和最小。区别是:螺纹测量时,选取关注区内的螺纹牙顶边缘过渡带的特征点,利用最小二乘法拟合直线方法,将特征点投影在 x 轴上,确定螺纹牙顶期望边缘定位,计算左右螺纹牙顶投影在 x 轴平均位置之间的距离 $d = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v x_{右顶i}^{k+2} - \frac{1}{u} \sum_{i=1}^u x_{左顶i}^{k+2}$; 量块测量时,是将量块两条边缘过渡带上的像素点沿着 x 轴上投影,计算两组投影点的平均位置之间距离。在测量精度上,两者是完全一致的。通过以上试验,可以验证本文提出的螺纹测量算法原理的正确性,在同样测量条件下,当被测螺纹中心轴线与 x 轴具有一定倾斜角度(位姿 2、3、5、6、7 和 8)时,螺纹测量精度可以达到 2 μm 以内。

4.2 M2.5 螺纹大径测量对比实验

实验测量对象是一个标准公制螺纹 M2.5,如图 1 所示。分别在 103341 型螺纹测量机和 MV-TOSED

P 精密自动影像测量仪上,对螺纹大径进行测量对比试验。方法 1 是在 103341 型螺纹测量机上测量螺纹大径的实际尺寸;方法 2 是在 MV-TOSED

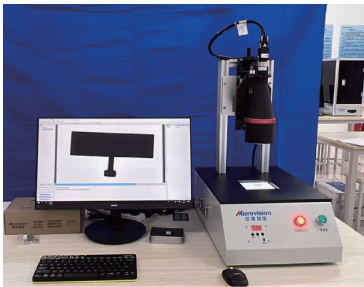


图 12 MV-TOSED 高精自动影像测量仪
Fig. 12 MV-TOSED high-precision automatic image measuring instrument

精密自动影像测量仪上,采用论文方法测量螺纹大径,如图 12 所示。当螺纹放置在载物台上时,由于螺帽和螺纹杆直径不同,造成螺纹杆的轴向测量偏差,因此采用量块进行高度补偿。对同一公制螺纹 M2.5 获取不同位姿的螺纹图像,如图 13 所示。

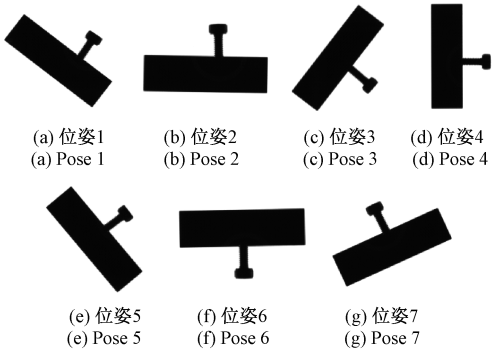


图 13 不同位姿的螺纹图像
Fig. 13 Thread images in different poses

图像分割量块后,采用论文提出的基于螺纹牙顶线回归修正测量基准后的螺纹图像,如图 14 所示。基于机器视觉测量螺纹大径的实验结果,如表 3 所示。

方法 1,根据重庆市重科理化计量中心有限公司提供的测试报告,M2.5 标准螺纹(图 1 所示)大径的测量结果为 2.410 7 mm;方法 2,对同一公制螺纹 M2.5 采用论文方法,当螺纹中心轴线与 x 轴具有一定倾斜角度(位姿 a、c、e 和 g),螺纹当量为 45.22 时,测量螺纹大径的平均值是 2.413 8 mm,平均测量时间是 2.480 1 s。两种方法的测试结果相差 0.003 1 mm。实验表明 MV-TOSED 高精自动影像测量仪的测量精度与 103341 型螺纹测量机的测量精度相当,可以满足 M2.5 标准螺纹大径的测量要求。

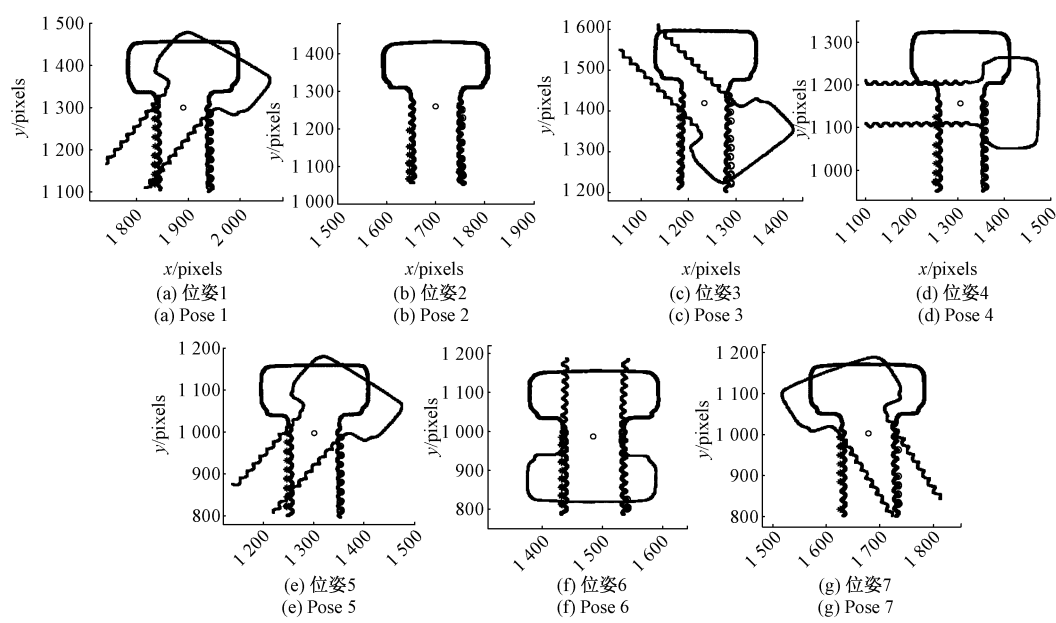


图 14 修正中心轴线后的螺纹图像

Fig. 14 Thread image after correcting the central axis

表 3 测量螺纹大径的实验结果

Table 3 Experimental results of measuring the major diameter of threads (mm)

两种测量方法比较	位姿 <i>a</i>	位姿 <i>b</i>	位姿 <i>c</i>	位姿 <i>d</i>	位姿 <i>e</i>	位姿 <i>f</i>	位姿 <i>g</i>
方法 1 测量螺纹大径				2.410 7			
方法 2 测量螺纹大径	2.405 4	2.401 8	2.414 8	2.392 3	2.415 4	2.422 50	2.419 5
与方法 1 差值	-0.005 3	-0.008 9	0.004 1	-0.018 4	0.004 7	0.011 82	0.008 8

从表 3 不难看出,当螺纹中心轴线垂直逼近坐标轴(位姿 *b*, *d* 和 *f*)时,方法 2 测量偏差分别为 $-0.008\ 9$, $-0.018\ 4$ 和 $0.011\ 82\ \text{mm}$,测量结果波动性较大;当螺纹中心轴线与 *x* 轴具有一定倾斜角度(位姿 *a*, *c*, *e* 和 *g*)时,方法 2 测量偏差分别为 $-0.005\ 3$, $0.004\ 1$, $0.004\ 7$ 和 $0.008\ 8\ \text{mm}$,单个测量结果偏差在 $10\ \mu\text{m}$ 以内。这是因为当螺纹中心轴线与 *x* 轴具有一定倾斜角度时,螺纹牙顶期望边缘会穿过多个像素,为直线拟合提供了丰富的数据信息,并且在一定倾斜角度情况下,边缘定位点同时具备行和列两个方向的叠加计算,起到一定程度的平滑和均化作用,减少了随机误差因素的影响。

上述对比实验结果表明,本文提出的螺纹大径测量算法是一种原理简单、计算速度快、能够有效定位螺纹测量基准,并且消除机器视觉测量随机误差影响的高精度算法。可以满足公制小螺纹的大径测量要求。

5 结 论

论文提出一种螺纹牙顶线回归修正测量基准大径视觉测量方法,提取像素级精度的螺纹边缘过渡带,基于拟合优度修正螺纹测量基准,并将螺纹牙顶过渡带内的像素点映射到 *x* 轴上,利用大样本数据对螺纹牙顶边缘位置进行统计计算。采用标准量块对所提算法进行标定。当量块中心轴线与 *x* 轴具有一定倾斜角度时,采用论文算法测量量块的最大偏差是 $0.001\ 7\ \text{mm}$ 。分别采用螺纹视觉测量仪和螺纹测量机对同一公制螺纹 M2.5 进行了测量实验。实验结果显示:当螺纹中心轴线与 *x* 轴具有一定倾斜角度时,采用论文提出的螺纹牙顶边缘位置定位算法和螺纹的大径视觉测量模型的测量结果与 103341 型螺纹测量机的测量结果相比,测试结果相差 $3.1\ \mu\text{m}$,最大测量偏差为 $8.8\ \mu\text{m}$,平均测量时间是 $2.480\ 1\ \text{s}$ 。实验结果表明:论文提出的测量算法和测量模型的计算速度快,计算误差较小,能够准确定位螺纹牙

顶线的真实位置,能够满足公制小螺纹的快速测量要求。作为公制小螺纹快速测量的一项新技术,方法具有良好的实际应用价值。

参考文献

- [1] 苑玮琦,刘杨,高泉禹,等. 轮辋类螺纹表面成像的光照方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 230-239.
- YUAN W Q, LIU Y, GAO X Y, et al. Illumination method of rim thread-like surface imaging[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 230-239.
- [2] 刘思奇,魏沛堂,胡瑞,等. 行星滚柱丝杠螺纹加工误差统计分析国内外对比研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(8): 1713-1727.
- LIU S Q, WEI P T, HU R, et al. Statistical analysis of planetary roller screw thread machining errors and comparative study at home and abroad [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(8): 1713-1727.
- [3] 林希萌,禹静,杨艳玲,等. 高精度三维螺纹测量机接触式扫描测头动态特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 92-98.
- LIN X M, YU J, YANG Y L, et al. Study on contact scanning probe dynamic characteristics of high precision 3D thread measuring machine [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 92-98.
- [4] 杨艳玲,禹静,林希萌,等. 三维螺纹测量机接触式测头的优化设计[J]. 中国机械工程, 2021, 32(15): 1812-1817.
- YANG Y L, YU J, LIN X M, et al. Optimal design of contact probes for three-dimensional thread measuring machines [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(15): 1812-1817.
- [5] 刘浩,党养正,程锡铜,等. 三坐标测量机测量螺纹量规的一种方法[J]. 计测技术, 2013, 33(1): 29-31.
- LIU H, DANG Y ZH, CHENG X T, et al. Thread gauge measurement with CMM[J]. Metrology & Measurement Technology, 2013, 33(1): 29-31.
- [6] 韩奕璇,高豆豆,董登峰,等. 面向工业视觉测量的多光斑质心快速高精度提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2026, 47(2): 296-308.
- HAN Y X, GAO D D, DONG D F, et al. High-precision and real-time centroid extraction method for multi-spot patterns in industrial visual measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2026, 47(2): 296-308.
- [7] MIN J. Measurement method of screw thread geometric error based on machine vision [J]. Measurement and Control, 2018, 51(7/8): 304-310.
- [8] 江涛,李媛,贺晨龙. 基于轮廓角点检测的螺纹关键参数视觉测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7): 54-61.
- JIANG T, LI Y, HE CH L. Visual measurement method of thread key parameters based on contour corner detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(7): 54-61.
- [9] 李现友. 基于机器视觉的复杂零件精密测量方法与应用[D]. 北京:北京科技大学, 2023.
- LI X Y. Precision measurement method and application of complex parts based on machine vision [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [10] CHEN M L. Compensation of thread profile distortion in image measuring screw thread [J]. Measurement, 2018, 129: 582-588.
- [11] LI X Y, WANG SH, XU K. Automatic measurement of external thread at the end of sucker rod based on machine vision [J]. Sensors, 2022, 22(21): 8276.
- [12] 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.
- WANG K, DONG ZH X, SUN X W, et al. Study on on-machine measurement system for contour parameters of petroleum drill pipe thread [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1618-1625.
- [13] LIU L, LIU Z J, QIAN X F. Online inspection method and system design for screw threads of rebar head based on machine vision [J]. Buildings, 2024, 14(9): 2989.
- [14] 张诗婧,莫绪涛,董杨林,等. 球面折反射成像的内螺纹螺距视觉测量系统 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(10): 211-220.
- ZHANG SH J, MO X T, DONG Y L, et al. Spherical catadioptric imaging visual measurement system for internal thread pitch [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(10): 211-220.
- [15] ZHANG L, LIU X, ZHANG CH, et al. A high-quality ellipse detection method for machine vision based on geometric constraints and hierarchical clustering [J].

Instrumentation, 2025, 12(3): 39-52.

- [16] 代国成, 罗哉, 江文松, 等. 基于机器视觉的小尺寸外螺纹关键参数检测方法[J]. 制造技术与机床, 2023(8): 161-165.
DAI G CH, LUO Z, JIANG W S, et al. Detection method of key parameters of small external thread based on machine vision [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023(8): 161-165.
- [17] 支珊, 赵文珍, 赵文辉, 等. 基于齿轮局部图像的齿距机器视觉测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 225-231.
ZHI SH, ZHAO W ZH, ZHAO W H, et al. Machine vision measurement method of tooth pitch based on local image of gear[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 225-231.
- [18] 杜坡, 段振云, 张静, 等. 基于双目视觉的大直径零件转角高精度测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(4): 35-43.
DU P, DUAN ZH Y, ZHANG J, et al. High-precision measurement method of the corner of large-diameter parts based on binocular vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(4): 35-43.

作者简介



支珊(通信作者),2007 年于沈阳航空航天大学获得学士学位,2019 年于沈阳工业大学获得博士学位,现为辽宁科技学院讲师,主要研究方向为人工智能与模式识别、精密测量与智能系统、视感新技术。
E-mail:zs110669654@163.com

Zhi Shan (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Shenyang Aerospace University in 2007, and her Ph. D. degree from Shenyang University of Technology in 2019. She is currently a lecturer at Liaoning Institute of Science and Technology. Her main research interests include artificial intelligence and pattern recognition, precision measurement and intelligent systems, and vision-sensing new technologies.



杨忠凤,2006 年于沈阳航空航天大学获得学士学位,2009 年于沈阳航空航天大学获得硕士学位,现为大连市技师学院讲师,主要研究方向为模具设计与制造。
E-mail:781034779@qq.com

Yang Zhongfeng received her B. Sc. and M. Sc. degrees both from Shenyang Aerospace University in 2006 and 2009, respectively. She is currently a lecturer at Dalian Technician Institute. Her main research interests include being mold design and manufacturing.