

基于机器视觉滑轨截面圆弧尺寸的测量方法*

吕庆海^{①②} 王中任^{①②} 周署明^{①②} 柯希林^{①②} 刘海生^{①②} 颜明^③

(①湖北文理学院机械工程学院, 湖北 襄阳 441053; ②智能制造与机器视觉襄阳市重点实验室, 湖北 襄阳 441053; ③襄阳寒桦精机有限公司, 湖北 襄阳 441001)

摘要: 为解决汽车座椅滑轨截面圆弧尺寸人工检测效率低、一致性差的问题, 文章提出了一种基于卡尺边缘检测与 Tukey 算法相结合的测量方法, 实现滑轨截面圆弧尺寸高效率、高精度的检测。首先对采集到的图像做双边滤波处理, 去除图像中的噪声, 再通过 HALCON 算法库中的 Emphasize 算子对图像做处理, 突出图像边缘信息; 然后通过卡尺边缘检测算法提取圆弧边缘点; 最后结合加权 Tukey 的最小二乘法分离出异常点并完成圆的拟合。实验结果表明, 该方法可实现滑轨截面圆弧尺寸的快速检测, 测量系统稳定性好、可靠性高, 测量误差均在 0.08 mm 之内, 重复测量精度可达 0.02 mm。

关键词: 机器视觉; 圆弧测量; 双边滤波; Tukey 算法

中图分类号: TG86 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2024.02.014

Measurement method of arc dimension of slide section based on machine vision

LV Qinghai^{①②}, WANG Zhongren^{①②}, ZHOU Shuming^{①②}, KE Xilin^{①②}, LIU Haisheng^{①②}, YAN Ming^③

(①School of Mechanical Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, CHN;

②Xiangyang Key Laboratory of Intelligent Manufacturing and Machine Vision, Xiangyang 441053, CHN;

③Xiangyanghanhua Fine Machine Co., Ltd., Xiangyang 441001, CHN)

Abstract: In order to solve the problems of low efficiency and poor consistency in manual detection of the arc dimension of the slide section of car seat, a measuring method based on the combination of caliper edge detection and Tukey algorithm was proposed, which realized the detection of the arc dimension of the slide section with high efficiency and high precision. First, the collected images were processed by bilateral filtering to remove the noise in the images, and a emphasize operator in the HALCON algorithm library was used to process the images and highlight the edge information of the images. Then the arc edge points were extracted by caliper edge detection algorithm. Finally, the outliers were separated by the least square method of weighted Tukey and the circle fitting was completed. The experimental results showed that this method could realize the rapid detection of the arc dimension of the slide section, and the measuring system had a good stability and high reliability. The measuring errors were all within 0.08 mm, and the repeated measurement accuracy could reach 0.02 mm.

Keywords: machine vision; arc measurement; bilateral filtering; Tukey algorithm

滑轨作为汽车座椅重要的安全部件, 起到固定、位姿调节等作用, 滑轨端面尺寸直接影响滑轨运动的流畅度, 故要保证滑轨端面尺寸的精度。滑轨成型可采用冲压成型方式, 产品精度主要靠模具保证, 但长期的冲压会造成模具的变形^[1], 使产品尺寸超

差。当前在工业生产中通常需要人工利用检具对滑轨尺寸进行检测, 受人员主观判断影响, 产品的一致性较差且检测效率低。

检测技术是制造与加工的基础技术, 是保证产品质量和加工精度的关键^[2]。随着计算机技术不断

* 襄阳市研究与开发项目 (2022ABH006476)

地发展，机器视觉测量技术被广泛地应用^[3]，由于机器视觉是一种非接触式测量技术，具有稳定性高、测量速度快、测量精度高等特点，是近年来许多国内外学者研究的热点方向。陈怡然等^[4]通过阈值分割与形态学做图像处理，用最小二乘法拟合圆弧测量圆形零件的尺寸。李执等^[5]利用Ramer算法实现图像轮廓的分割，利用卡尺的边缘点检测和Tukey算法实现对金属工件尺寸的测量。任永强等^[6]利用双边滤波和形态学算法做图像处理，用Canny算子提取边缘点，用RANSAC算法实现对缸套直径尺寸的测量。马晓锋等^[7]利用引导滤波去噪，用Canny算子提取曲轴螺纹孔边缘，最后用神经网络拟合螺纹孔实现曲轴螺纹孔的高精度检测。Li Y等^[8]等提出一种双非接触式传感器联合测量钢轨直线度的方法，实现钢轨直线度高精度、高效率的测量。Meng Y等^[9]采用激光三角测量法实现钢轨轮廓线尺寸的动态测量。Xiong Z H等^[10]建立一套视觉系统，实现小尺寸圆环内外圆的圆度、尺寸等测量。

针对滑轨端面圆弧尺寸测量问题，本文搭建了视觉检测平台，提出一种基于卡尺边缘点检测算法与Tukey算法相结合的方法实现滑轨端面圆弧的测量，减少参与运算的数据量，保证测量精度的同时提高检测效率。

1 测量系统设计

为实现滑轨端面4个圆弧半径的自动测量，设计一套视觉检测系统如图1所示。相机选择大华生产的600万分辨率，型号为A3600MG18的面阵卷帘曝光相机。为增加检测精度，降低镜头畸变对测量结果的影响，选择工作距离为166±10 mm、放大倍率为0.166X的远心镜头。为突显滑轨截面特征，

采用直径为180 mm低角度LED环形光源。

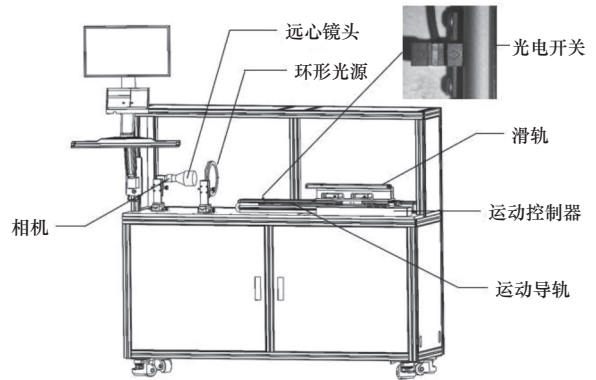


图1 视觉检测系统

整套装置由PLC主导，滑轨的载体为一套直线模组，PLC控制步进电机驱动模组向左右移动，按运动控制器上的开始键，滑轨开始向左运动。当模组移动到光电开关位置，运动平台停止运动，相机开始拍摄滑轨端面。待相机拍照完成后，通过软件对获取的滑轨端面图片做图像处理，提取圆弧的边缘点，再对提取的边缘点进行去噪与圆弧的拟合。检测完成后直线模组载动滑轨移动到右边起始点位置。滑轨截面圆弧尺寸检测流程如图2所示。

通过该测量系统采集到的滑轨端面原始图像如图3所示，图中箭头标注的Circle 1至Circle 4表示滑轨端面待测量的圆弧位置，需测量图中标注4个位置圆弧的半径。

2 图像预处理及边缘点提取

通过图像预处理，过滤掉图像中的干扰信息，保留有用的信息，为后续边缘信息的精准提取提供保障。在图像处理部分，本节先利用双边滤波和emphasize算子对图像做去噪、增强处理，然后利

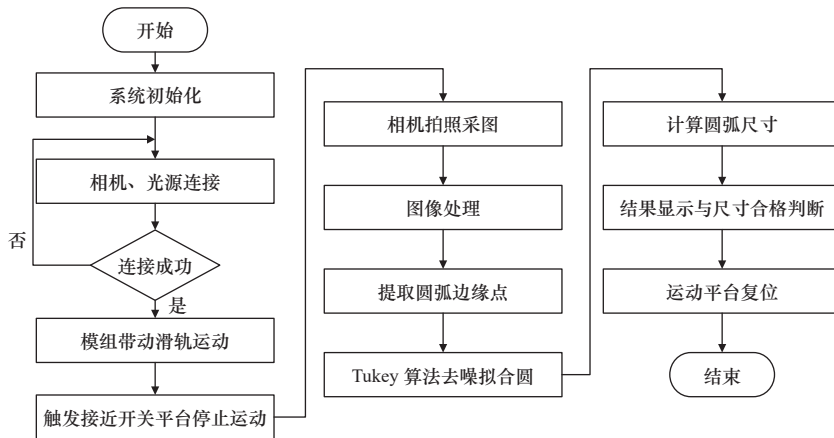


图2 圆弧尺寸检测流程图

用卡尺边缘检测算法提取边缘点。

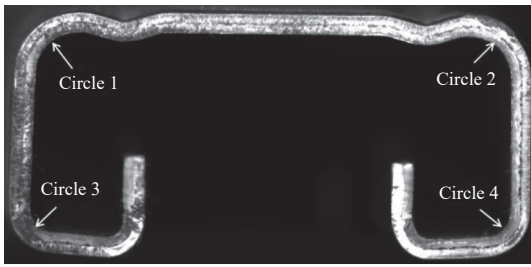


图3 系统采集滑轨截面图

2.1 双边滤波

双边滤波是一种保边非线性滤波算法，该滤波算法在平滑图像去除噪声的同时可以保留图像的边缘信息，具有非迭代、运算简单等优点。其原理是将高斯权系数优化为图像亮度信息与高斯函数的乘积，利用优化后的高斯权系数同图像信息做卷积运算，通过这种运算方法实现图像的滤波和保边^[11]。具体定义如下：

$$\begin{cases} I(p) = \frac{1}{w_p} \sum_{q \in s} G_{\sigma_s}(\|p-q\|) G_{\sigma_r}(\|I_p - I_q\|) I_q \\ w_p = \sum_{q \in s} G_{\sigma_s}(\|p-q\|) G_{\sigma_r}(\|I_p - I_q\|) \end{cases} \quad (1)$$

式中： p 表示模板中心位置的像素点， s 表示 p 的邻域， q 表示邻域内的像素点， w_p 为归一化的参数， $I(p)$ 为滤波后的像素值， I 为像素点的亮度， G_{σ_s} 表示空间函数， G_{σ_r} 表示亮度函数，两函数的具体定义见式(2)。

$$\begin{cases} G_{\sigma_s}(\|p-q\|) = \exp\left(-\frac{|x_p - x_q|^2 + |y_p - y_q|^2}{2\sigma_s^2}\right) \\ G_{\sigma_r}(\|p-q\|) = \exp\left(-\frac{|I_p - I_q|^2}{2\sigma_r^2}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中： (x_p, y_p) 表示模板中心像素的坐标， (x_q, y_q) 表示邻域像素的坐标， I_p 表示其中表示模板中心像素值， I_q 表示邻域像素值， σ_s 表示空间标准差， σ_r 表示亮度标准差。当 σ_s 和 σ_r 参数设定较大时，会使图像变得模糊消除纹理特征，失去保边的作用；当 σ_s 和 σ_r 参数设定较小时，双边滤波的效果不明显，因此要根据不同的图像特征设定合适的参数，在对图像做平滑去噪的同时不损失边缘信息。根据设定的参数按照从式(2)到式(1)的计算顺序可以得出滤波后的像素值 $I(p)$ 。

2.2 图像增强

在图像增强领域内，直方图均衡算法是最基本的图像增强算法，具有原理简单、实时性好且易

于实现等优点，其缺点主要为灰度级个数减小导致局部细节丢失，算法未考虑图像边缘信息，不能用于细节的增强^[12]。而经HALCON算法库中的emphasize算子处理的图像可以很好地突显出滑轨边缘特征。

经视觉系统采集的滑轨截面图有很多干扰信息，如图4箭头标注，这些信息会影响圆弧边缘提取的精度。经双边滤波和emphasize算子处理后的图像可以清晰地显示出滑轨端面圆弧的边缘信息，经过图像处理后的效果如图5所示，与系统采集的原图相比，其中的干扰信息被滤除并保留了圆弧的边缘信息，为后续的圆弧边缘点精确提取提供保障。

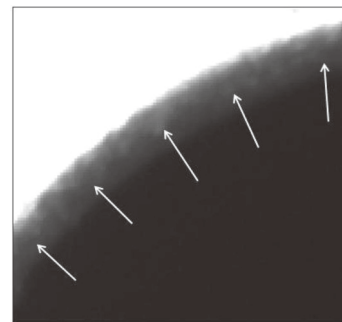


图4 系统采集原图



图5 图像处理后的效果图

2.3 边缘点提取

边缘点的提取效果直接影响了系统的检测精度。为了提高检测效率和拟合后圆弧的精度，本文提出一种基于卡尺边缘检测算法的方法实现对滑轨截面圆弧边缘点的提取，通过卡尺边缘检测算法可以获得亚像素级的边缘点位置信息，检测精度高，其检测步骤如下：

- (1) 在圆弧轮廓上生成等距等大的测量矩形，按照矩形的生成顺序确定边缘点顺序。
- (2) 利用高斯滤波对目标边缘进行平滑处理。
- (3) 计算测量矩形内像素点的梯度幅度值。

(4) 利用非极大值抑制算法确定最佳边缘点。

卡尺边缘检测算法的特点是可以根据需要自定义卡尺的数量和卡尺尺寸，边缘点的检测由卡尺工具所使用的测量矩形大小确定，测量精度由矩形卡尺数量确定。本次试验所使用的卡尺工具长、宽分别为 60 和 15，卡尺数量为 20。在接近滑轨截面圆弧边缘位置绘制圆，在圆上按照确定方向等距生成 20 个矩形测量卡尺，在测量卡尺内部计算每个像素的幅度值，通过非极大值抑制算法寻找的最优边缘点。边缘点最终的提取效果如图 6 所示。

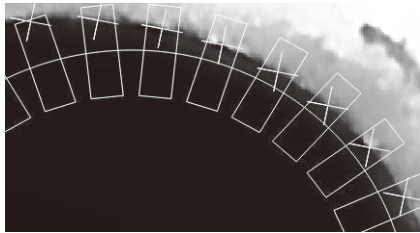


图 6 边缘点提取效果

3 滑轨截面圆弧拟合

利用卡尺边缘检测算法可得到边缘点，需对提取的边缘点进行圆拟合。在平面拟合直线、圆等领域最常用的拟合方法为最小二乘法，由于其拟合原理是使样本点与拟合曲线函数的偏差平方和最小，使其对离群点比较敏感，对于样本中存在较大离群点时拟合结果偏差较大。

为了进一步提升拟合后圆弧的尺寸精度，需将卡尺边缘检测算法提取的边缘点进行优化，去除离群点对拟合结果的干扰，提出利用 Tukey 的算法实现噪点的分离，可以降低离群点对结果的影响，提高圆弧的拟合精度与准确性。其检测原理是对样本点赋不同的权重 ω_i ，以直线为例，对于距离拟合的直线较近的样本点将其权重 ω_i 设为 1，距离较大的样本点将权重设定 $\omega_i \ll 1$ ，通过迭代计算样本点的权重值消除离群点。Tukey 权重函数如下：

$$\omega(\delta) = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{\delta}{\tau}\right)^2\right]^2, & |\delta| \leq \tau \\ 0, & |\delta| > \tau \end{cases} \quad (3)$$

式中： δ 为点到直线的距离， τ 为削波因数。当离群值较大 ($\delta > \tau$) 时，其权重为 0 即可消除离群点；当 $\delta \leq \tau$ 时，各样本点的权重根据距离分配。削波因数可根据如下推导确定。

设样本点中所得距离满足高斯分布：

$$f(\delta) = \int \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\delta-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

标准方差为

$$\delta_\sigma = \sum_{i=1}^{n-1} (\delta_i - \mu_\sigma)^2 = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\delta_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} \delta_i \right)^2 \quad (5)$$

式中： μ_σ 表示距离的期望值，削波因数通常取 $\tau = 2\delta_\sigma$ 。确定削波因数后即可通过引入权重函数的 Tukey 的最小二乘法完成点的去噪及拟合。通过 Tukey 算法可实现边缘点的去噪处理，消除离群点对测量结果的影响，再利用去噪后的边缘点位信息用作圆弧拟合的数据，通过最小二乘法进行圆的拟合，将滑轨截面的四个位置圆的拟合效果进行可视化处理，如图 7 所示。

相机标定是机器视觉和测量技术中最重要的一步^[13]，本系统的拟合过程是以像素为单位的，为测量拟合圆的真实半径，需将像素换算转成以毫米为单位，通过相机标定可建立像素坐标与世界坐标之间的联系，实现像素距离与实际距离的转换。通过相机的标定可得出像素距离 a 与实际距离 $b(\text{mm})$ 之间的关系， (a/b) 表示单位像素代表的实际距离，系统最终的标定结果为 $(a/b) = 0.0135 \text{ mm}$ ，即被测物体的实际尺寸 = 像素点个数 $\times (a/b)$ ，通过该方法确定拟合圆的实际半径。

4 实验结果分析

为了验证滑轨截面圆弧检测系统的适用性，选取 10 种不同的滑轨，分别通过视觉测量系统和型号为 W15-M2-17-15891 的 FARO 测量仪对每个滑轨截面圆弧的 4 个半径进行检测，视觉系统测量结果为测量值，FARO 测量仪检测结果为标准值，对 4 个圆弧半径的测量结果见表 1~表 4。将两台设备的检测值作差取绝对值，确定系统的最大测量误差。Circle 1 和 Circle 2 的半径测量要求为 $3.5 \pm 0.1 \text{ mm}$ ，Circle 3 和 Circle 4 的半径测量要求为 $2.0 \pm 0.1 \text{ mm}$ 。

由表 1~表 4 的测量结果可知，测量系统的最大测量误差为 0.08 mm，最小测量误差为 0.012 mm，满足工业要求的测量误差保持在 0.1 mm 之内，将上表中的 40 个误差结果进行可视化处理，系统的测量误差如图 8 所示。

为检验视觉检测系统的重复精度，通过该系统对同一滑轨截面 4 个位置的圆弧半径进行 5 次重复测量，测量结果见表 5，计算测量值之间的偏差得出视觉系统的最大重复检测精度为 0.02 mm。

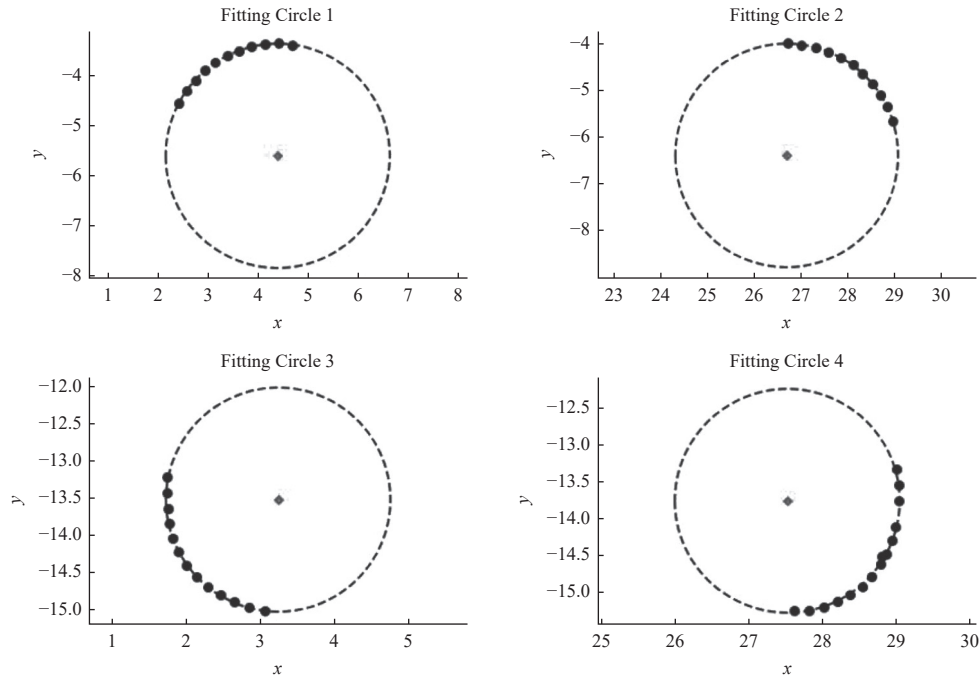


图7 圆拟合可视化

表1 Circle 1 测量结果

待测滑轨	滑轨1	滑轨2	滑轨3	滑轨4	滑轨5	滑轨6	滑轨7	滑轨8	滑轨9	滑轨10
测量值/mm	3.506	3.496	3.565	3.539	3.493	3.546	3.605	3.556	3.535	3.515
标准值/mm	3.523	3.512	3.505	3.551	3.534	3.497	3.546	3.513	3.575	3.571
误差值/mm	0.017	0.016	0.06	0.012	0.041	0.049	0.059	0.043	0.04	0.056

表2 Circle 2 测量结果

待测滑轨	滑轨1	滑轨2	滑轨3	滑轨4	滑轨5	滑轨6	滑轨7	滑轨8	滑轨9	滑轨10
测量值/mm	3.521	3.511	3.476	3.492	3.542	3.611	3.559	3.517	3.493	3.562
标准值/mm	3.581	3.559	3.504	3.536	3.563	3.591	3.523	3.476	3.533	3.526
误差值/mm	0.06	0.048	0.028	0.044	0.021	0.02	0.036	0.041	0.04	0.036

表3 Circle 3 测量结果

待测滑轨	滑轨1	滑轨2	滑轨3	滑轨4	滑轨5	滑轨6	滑轨7	滑轨8	滑轨9	滑轨10
测量值/mm	2.056	2.025	1.965	2.033	1.979	2.112	2.063	2.011	1.996	2.021
标准值/mm	2.031	2.076	2.035	2.076	1.956	2.071	2.025	1.976	2.076	2.079
误差值/mm	0.025	0.051	0.07	0.043	0.023	0.041	0.038	0.035	0.08	0.058

表4 Circle 4 测量结果

待测滑轨	滑轨1	滑轨2	滑轨3	滑轨4	滑轨5	滑轨6	滑轨7	滑轨8	滑轨9	滑轨10
测量值/mm	2.065	2.013	1.957	1.979	2.087	2.018	1.968	2.120	1.971	2.041
标准值/mm	2.035	2.069	2.028	2.013	2.013	2.064	2.039	2.061	2.045	2.013
误差值/mm	0.3	0.056	0.071	0.034	0.074	0.046	0.071	0.059	0.074	0.028

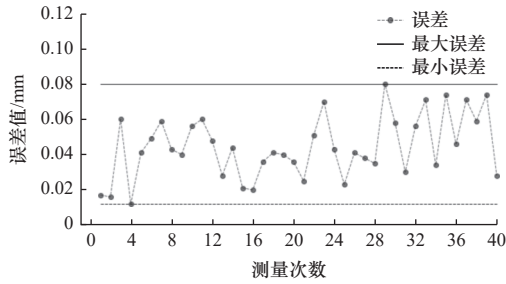


图8 视觉系统测量误差

表5 重复精度测量结果

测量位置	第一次测量/mm	第二次测量/mm	第三次测量/mm	第四次测量/mm	第五次测量/mm	重复精度/mm
Circle 1	3.502	3.513	3.509	3.511	3.5	0.013
Circle 2	3.496	3.512	3.506	3.505	3.516	0.02
Circle 3	2.021	2.009	2.005	2.012	2.016	0.016
Circle 4	2.012	2.016	2.023	2.02	2.019	0.011

经现场调研，合作厂商通过人工利用检具对单个滑轨截面圆弧尺寸的检测时间为12 s，受人员主观判断影响，产品尺寸一致性差、检测精度低，且会对滑轨表面产生磕碰。而通过视觉系统检测滑轨截面圆弧尺寸，从设备开始运行到检测结束仅需4.5 s，实现了滑轨截面圆弧尺寸的无伤测量，与人工检测相比大幅提升了检测效率。

5 结语

针对滑轨截面圆弧半径人工检测效率低问题，本文提出一种检测速度快，测量精度高的圆弧半径测量方法。实验表明通过该测量方法，系统测量误差均在0.08 mm之内，重复测量精度为0.02 mm，测量精度满足滑轨尺寸的测量要求。该滑轨尺寸测量系统具有一定的实用性，其稳定性好、可靠性高，实现了滑轨截面圆弧尺寸的自动测量，提高了滑轨截面圆弧尺寸的检测效率与检测精度。

参考文献

- [1] 石光林, 程金海, 夏明祥, 等. 冲压模具的结构变形分析及型面补偿技术 [J]. 锻压技术, 2018, 43(8): 168-172.
- [2] 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.
- [3] 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, 2022(6): 1-15.
- [4] 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.
- [5] 李执, 阎坤, 傅琪, 等. 基于机器视觉的金属工件尺寸测量 [J]. 仪表技术与传感器, 2022(3): 92-97.
- [6] 任永强, 涂德江, 韩暑. 基于机器视觉的柴油机缸套尺寸测量 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(9): 151-153.
- [7] 马晓锋, 王中任. 基于引导滤波与神经网络算法的螺纹孔检测方法 [J]. 制造技术与机床, 2022(1): 165-170.
- [8] Li Y, Li M X, Xia X Y, et al. Rail straightness detection method based on the cooperation of dual laser sensors [J]. Measurement, 2022, 199: 111435.
- [9] Meng Y, Chen F, Hao X D, et al. Research on rail profile measurement method based on machine vision [C]. 2020 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE, 2020: 2576-2581.
- [10] Xiong Z H, Zuo Z J, Li H, et al. Research on dynamic measurement of hot ring rolling dimension based on machine vision [J]. IFAC-PapersOnLine, 2022, 55(3): 125-130.
- [11] 南栋, 毕笃彦, 马时平, 等. 一种基于参数估计的自适应双边滤波算法 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(11): 3840-3845.
- [12] 董丽丽, 丁畅, 许文海. 基于直方图均衡化图像增强的两种改进方法 [J]. 电子学报, 2018, 46(10): 2367-2375.
- [13] 石岩青, 常彩霞, 刘小红, 等. 面阵相机内外参数标定方法及进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(24): 9-29.

第一作者: 吕庆海, 男, 1996年生, 硕士研究生, 研究方向为智能制造与机器视觉。E-mail: 1281291225@qq.com

通信作者: 王中任, 男, 1974年生, 博士, 教授, 研究方向为智能制造与机器视觉。E-mail: wzrvision@hbuas.edu.cn

(编辑 李静)

(收修改稿日期: 2023-09-25)

文章编号: 20240215

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。