

基于视觉检测技术的轮毂位置精确测定

吕尧^{1,2}, 刘业峰^{1,2}, 赵科学^{1,2}, 雷翔鹏^{1,2}, 孙福英^{1,2}

(1. 沈阳工学院 辽宁省数控机床信息物理融合与智能制造重点实验室, 辽宁 抚顺 113122;

2. 沈阳工学院 机械工程与自动化学院, 辽宁 抚顺 113122)

摘要: 针对工业技术智能化的发展趋势, 及电动车轻质合金轮毂机械加工工艺, 对装卡位置精度要求高, 文章研究一种有效的轮毂装卡位置精准测定方法, 以解决当前检测方法, 易受人为因素影响、效率低、稳定性差等问题; 提出一种基于机器视觉技术的非接触式轮毂装卡位置精确测定方法, 应用 CCD 工业相机搭建视觉检测系统, 运用双特征位置精确测定方法, 提取相机摄入图像中轮毂气门孔和中心孔的两处主要特征, 通过对双特征数据的分析与计算确定轮毂位置精度误差, 并根据计算数据输出装卡位置误差, 应用分段位移、逐渐次定位的方式进行反馈补偿; 通过实验测量表明, 在系统的测量参量值中, 角度标准差为 0.0226° , 测量不确定度为 0.0036° , 测量精度理想, 平均检测时间为 0.29 s , 检测时效性良好, 能够满足轮毂自动化加工位置检测的性能要求。

关键词: 视觉检测; 定位; 轮毂; 定位方法

Accurate Determination of Wheel Hub Position Based on Visual Inspection Technology

LÜ Yao^{1,2}, LIU Yefeng^{1,2}, ZHAO Kexue^{1,2}, LEI Xiangpeng^{1,2}, SUN FuYing^{1,2}

(1. Liaoning Key Laboratory of Information Physics Fusion and Intelligent Manufacturing for Grade CNC

Machine, Shenyang Institute of Technology, Fushun 113122, China; 2. College of

Mechanical Engineering and Automation, Shenyang Institute of Technology, Fushun 113122, China)

Abstract: In view of the development trend of intelligent industrial technology, and the requirements of light alloy wheel hub machining process for the accuracy of clamping position, an effective accurate determination method of wheel hub clamping position is studied, in order to solve the problems of current detection methods, such as easy to be affected by human factors, low efficiency, poor stability and so on. A non-contact accurate measurement method of wheel hub mounting position based on machine vision technology is proposed. A vision detection system is built by using CCD industrial camera. Two main features of wheel hub valve hole and center hole are extracted by using the accurate measurement method of double feature position. The accuracy error of wheel hub position is determined by analyzing and calculating the double feature data, according to the calculated data, the position error of the card is output, and the feedback compensation is carried out by means of subsection displacement and gradual positioning. The experimental results show that the angle standard deviation is 0.0226° , and the measurement uncertainty is 0.0036° in the

收稿日期: 2021-06-15; **修回日期:** 2021-07-23。

基金项目: 国家自然科学基金(62073226); 辽宁省自然科学基金重点领域联合开放基金(2020-KF-11-09); 沈抚示范区本级科技计划项目(2020JH13); 辽宁省中央引导地方科技发展资金(2021JH6/10500137)。

作者简介: 吕尧(1987-), 男, 辽宁沈阳人, 工程师, 大学本科, 主要从事智能机床设计与制造, 柔性自动化生产技术方向的研究。

通讯作者: 刘业峰(1981-), 男, 山东淄博人, 博士, 教授, 主要从事智能优化算法及应用、复杂系统建模及优化、智能制造等方向的研究。

引用格式: 吕尧, 刘业峰, 赵科学, 等. 基于视觉检测技术的轮毂位置精确测定[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1): 72-77.

measurement parameters of the system, the measurement accuracy is ideal, the average detection time is 0.29 s, and the detection timeliness is good, which can meet the performance requirements of wheel hub automatic machining position detection.

Keywords: vision inspection; positioning; hub; positioning method

0 引言

伴随工业 4.0 时代的到来, 工业技术得到迅猛发展, 自动化加工以其高精度、高速度、高稳定性, 已成为工业生产中最重要加工方式。轻质合金轮毂作为汽车、电动车等交通工具的关键部分, 因其传统的加工方式, 易受人为因素影响、效率低、稳定性差, 以难以满足高速发展市场需求。轻质合金轮毂的自动化加工势在必行^[1-2]。

在电动车轻质合金轮毂加工过程中, 因更换加工工序时, 需要对工件进行翻及调整角度后, 再重新装卡, 轮毂装卡位置是否精确, 便成为影响安装孔与气门孔铣削、钻削的加工精度的重要因素, 直接影响轮毂的气密性及安装精度。装卡位置精确测定便成为电动车轻质合金轮毂加工过程中的重要环节^[3-4]。现行的电动车轻质合金轮毂装卡位置精度测定, 主要应用传统人工接触式的双目测量法测定, 这种方式生产效率低、定位精度差, 易受人为因素影响, 在检测人员疲劳或精力不集中的情况下, 容易造成严重误判, 已无法满足智能化生产需求。基于计算机视觉的测量技术^[5], 因其非接触、高稳定性、高速度、低成本等特点, 能较好地满足电动车轻质合金轮毂的自动化加工装卡位置精度测定需求。文献 [6] 采用视觉检测技术对采集到的图像分别进行均值滤波和边缘分割检测, 以提高检测的精度以及检测的快速性。文献 [7] 采用视觉检测技术, 对采集到的图像进行边缘检测和边缘识别, 利用最小二乘法与霍夫变换两种直线识别方法提取图像中夹角两条边的倾斜角, 从而实现对工件的角度检测。文献 [8] 采用小波降噪的方法对相机采集到的图像进行优化, 再使用最大类间方差法, 计算得出适用于降噪后图片的最佳阈值来进行二值化处理, 以提高检测的视觉准确性。文献 [9] 使用 Canny 边缘检测算子检测边缘特征, 再使用改进后的随机霍夫圆检测算法检测断面轮廓, 提高了视觉检测算法的检测精度与效率。文献 [10] 采用机器视觉技术, 使用单目相机对靶标实时成像, 再通过二值化、轮廓提取等数字图像处理技术对靶标进行定位与跟踪, 有效

提高了测量效率和稳定性, 并实现了实时测量。

基于机器视觉的轮毂装卡位置精确测定的关键技术与优势在于, 通过用机器视觉系统, 来代替人眼识别与工具测量轮毂位置精度。即将轮毂位置精度信息, 通过机器视觉系统^[11-16]对视觉图像处理^[17-18], 将图像信号转换为数字信号输出, 根据呈现的结果, 计算轮毂装卡位置精度。

本文针对电动车轻质合金轮毂加工, 提出根据轮毂的关键参量值来判断轮毂装卡位置精度的方法, 建立基于视觉检测技术的轮毂装卡位置精确测定, 从而实现准确高效的检测轮毂装卡位置精度的目的, 更好的实现轮毂自动化加工。

1 轮毂自动加工工艺流程

金属切削加工是电动车轻质合金轮毂生产工艺过程中唯一的精加工过程, 是轻质合金轮毂加工中最为重要的环节。采用自动化加工方式, 因其高速度、良好的实时性、非接触、低成本等特点, 能够较好的满足轻质合金轮毂智能化的生产需求。电动车轻质合金轮毂自动化加工主要由数控车床对轮毂轮廓的车削加工, 及加工中心铣削、钻削加工组成, 如图 1。应用视觉检测系统, 对轮毂装卡位置精确测定, 根据测定结果, 分析计算准确装卡位置, 引导机械手对工件进行位移补差运动, 再抓取至后续加工, 这种检测与补偿方式很好的满足了, 电动车轻质合金轮毂装卡位置精度要求。

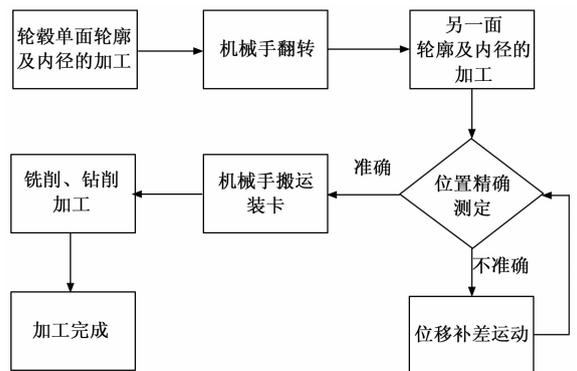


图 1 轮毂自动化加工流程图

2 搭建视觉检测系统

视觉检测系统主要由光源、镜头、CCD 相机、传感器、计算机等几部分组成,如图 2 所示。在工件进入视觉检测区域,传感器感应工件到位后,视觉系统调用相机采集视野内,由被测物体反射的光源,再经过 CCD 电荷耦合装置,将光信号转换成电信号,再将待测信息进行识别,并与标准信息模板进行对比,分析查找出位置误差,经过分析计算给出位移补差值,及最佳位移补差路径。

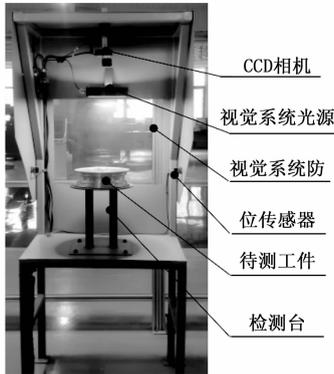


图 2 视觉检测系统简图

2.1 视觉检测光源

在视觉检测系统中,由于相机采集图像主要通过被测物体对光的反射来实现,光源便成为影响图像质量的重要条件,直接影响检测精度。对于轮毂装卡位置精度测定,这种可能有阴影问题的金属元件的检测特点。视觉系统选用 LED 漫射型前光源,作为视觉检测系统的光源。这种光更柔软、均匀,能有效减少眩光和阴影的几率低,覆盖区域也更大,能够消除热点,使 CCD 相机有理想的图像摄取环境。

2.2 视觉检测精度

影响视觉检测精度的因数主要有:视野、相机像素、分辨率、视觉工具精度。

如 CCD 相机水平方向视野为 FOV_1 ,垂直方向视野为 FOV_2 ,视觉工具精度为 N ,水平方向像素数量 P_1 ,垂直方向像素数量 P_2 ,则:

水平方向检测精度:

$$R_{\text{水平}} = \frac{FOV_1 \times 2N}{P_1} \quad (1)$$

垂直方向检测精度:

$$R_{\text{垂直}} = \frac{FOV_2 \times 2N}{P_2} \quad (2)$$

根据公式 (1) 和公式 (2) 可以得出,视觉系统检测精度与相机像素成正比关系,与视野大小成反比关系,即相机像素越高,分辨率越大,视野范围越小,检测精度越高。

3 轮毂装卡位置精确测定方法

3.1 双特征位置精确测定方法

因为轮毂装卡位置精度,对轮毂的位置与姿态有双重定位要求,为保证轮毂装卡位置精度的准确性,采用双特征位置精度测定的方法,相比也以往的单特征位置测定方法,双特征定位能够有效的消除微小误差,对工件姿态位置精度的影响。具体方法为:通过对轮毂两处主要典型特征,即轮毂气门孔位置与轮毂中心孔位置进行位置测定,根据测定结果计算分析轮毂姿态与位置,以达到精准测定。

应用视觉系统提取轮毂两处特征位置信息后,对信息进行分析计算,已知轮毂特征 1 (气门孔) 位置信息 x_1 、 y_1 ,轮毂特征 2 (中心孔) 位置信息 x_2 、 y_2 ,轮毂位置偏转角度 r ,则有:

$$r = \arctan \left| \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \right| \quad (3)$$

根据公式 (3),设计表格角度自动计算程序 $r = \text{ATAN} \left| \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \right| \times 180/\text{PI} ()$,应用程序导入轮毂两处特征参数,可计算出轮毂角度位置误差 r 。

3.2 图形特征提取与分析

图像采集处理完成后,需要提取检测特征,并与标准模板图像进行比对,轮毂装卡位置精确测定采用 In-Sight Explorer 软件对轮毂的气门孔位置与中心孔位置的两项基本特征进行提取,再分别将待测图像特征与标准模板图像进行比对,计算两者间的相似度,若计算结果符合相似度要求则认为位置符合,不符合要求则根据图像位置与标准位置的误差,计算出需要位移补差的距离或角度,具体流程如图 3 所示。

如图 3 所示,首先提取标准模板图像中的气门孔特征信息,如图 4,再在待测图像区域,查找气门孔特征的位置信息,如图 5,通过将找到的气门孔特征位置坐标 x_1 、 y_1 ,与标准模板中的气门孔特征位置坐标 x_{b1} 、 y_{b1} 进行比较,计算位置误差,若误差小于等于阈值,则气门孔特征位置符合要求。

再通过对轮毂中心孔特征的局部掩膜,完成对轮毂中心孔特征的提取,如图 6,在待测图像查找中心

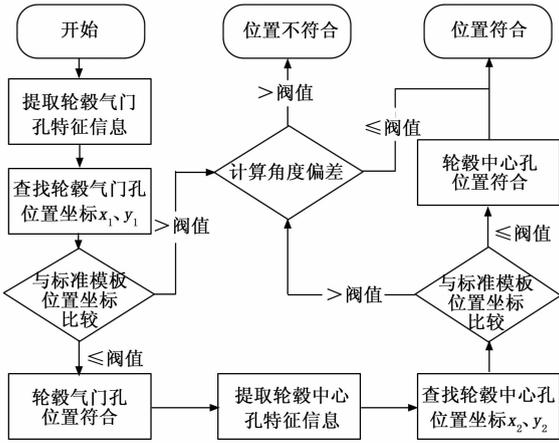


图 3 特征提取与分析流程图

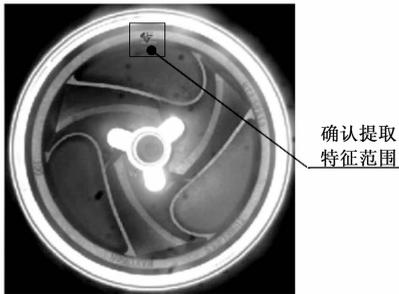


图 4 标准图像确认提取特征图

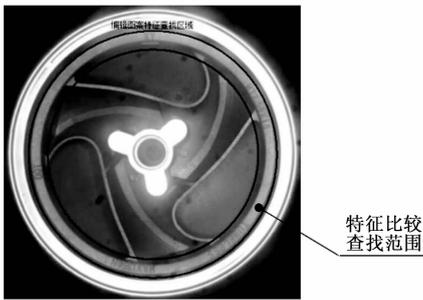


图 5 待测图像特征查找范围图

孔特征位置坐标 x_2 、 y_2 ，与标准模板中心孔特征位置坐标 x_{b2} 、 y_{b2} 进行比较，计算位置误差，若误差小于等于阈值，则中心孔位置也符合要求，双特征位置精度均符合，则检测轮毂位置符合装卡要求。气门孔和中心孔位置坐标误差，其中一项或全部大于阈值，则通过导入轮毂两处特征位置信息 (x_1 、 y_1 、 x_2 、 y_2) 到表格自动计算程序， $r = ATAN \left| \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \right| * 180/PI (^\circ)$ ，计算得到轮毂角度位置误差 r ，根据计算结果分析，位置误差 r 小于等于阈值，则轮毂位置符合装卡要求，若计算结果大于阈值，则轮毂位置不

符合装卡要求。

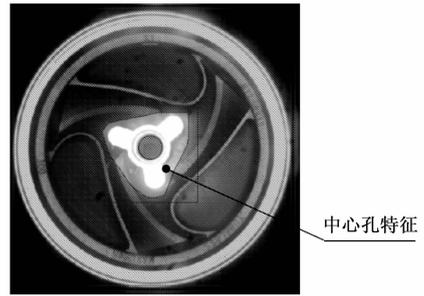


图 6 局部掩膜后中心孔特征

3.3 结果输出与反馈

因为轮毂加工的装卡方式，采用中心定位四周均匀卡紧，这种方式能够很好的保证轮毂的中心定位精度，这样轮毂定位精度仅存在角度定位误差，且误差带始终分布在以轮毂定位中心为圆心的等直径的圆周上，因此角度成为直接影响轮毂加工定位精度因素的主要参数，所以轮毂位置精确测定选用角度值作为主要输出结果，根据公式 (3) 通过表格自动计算程序 $r = ATAN \left| \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \right| * 180/PI (^\circ)$ ，应用轮毂两处特征参数计算角度作为输出结果，如图 7。

| 编辑图案特征查找区域 | Patterns | 1.000 | | | |
|------------|----------|-------|---------|---------|-------|
| | 索引 | 行 | Col | 角度 | |
| | Patterns | 0.000 | 580.920 | 356.445 | 0.943 |
| 传输结果 | | | | | |
| | | 0.943 | | | |

图 7 轮毂装卡位置精度传输结果

因单次测量精度存在误差，且视觉系统单次测量时间极其短，为减少误差值，轮毂位置精准测定，选用多次测量 (10 次) 取平均值的方式，减少测量误差，测量完成再后将输出结果反馈给机械手进行位移差补运动。

为减少机械手定位精度存在误差，位移差补时，针对位置偏差较大的工件，轮毂位置精度测定，选用分段位移、逐渐次定位的方式进行位移补差运动，设定角度 60° 为单次最大补差区间，即偏差大于 60° 的工件，以每次补差 60° 的方式，补差至剩余角度小于 60° ，再直接补差角度至符合要求。具体补差调整流程如图 8 所示。

移补差调整步骤：

1) 根据测量结果区分轮毂角度偏差范围，按不

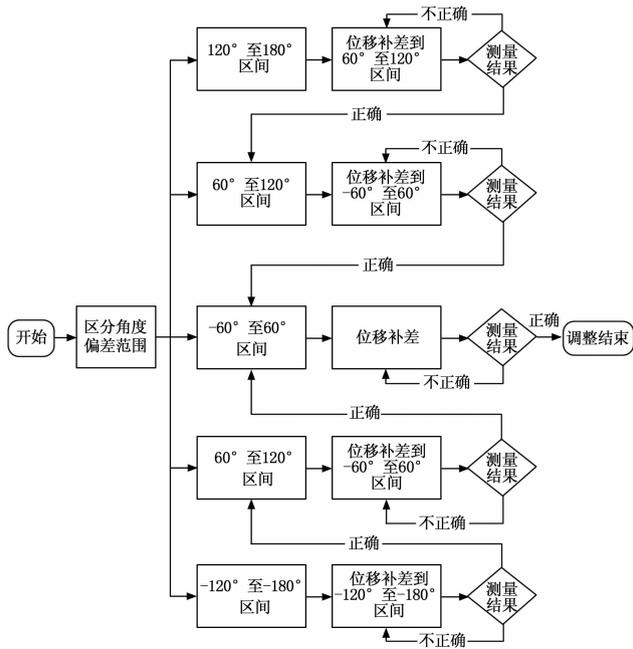


图 8 移补差调整流程图

同角度分为 -60° 至 60°、60° 至 120°、120° 至 180°、-60° 至 -120°、-120° 至 -180° 五个区间；

2) 对轮毂角度偏差在 120° 至 180° 或 -120° 至 -180° 区间的工件，统一位移补差 60° 到 60° 至 120° 或 -60° 至 -120° 区间，并再次测量；

3) 对轮毂角度偏差在 60° 至 120° 或 -60° 至 -120° 区间的工件，统一位移补差 60° 到 -60° 至 60° 区间，并再次测量；

4) 对轮毂角度偏差在 -60° 至 60° 区间的工件，直接位移补差测量结果至正确位置；

5) 测量补差结果，位置符合装卡要求视为调整结束。

4 实验结果与分析

选用 130 万像素、分辨率 1 280 × 1 024 的 CDD 相机，配合 LED 漫反射前光源，设置镜头距工件 620 mm，光源距工件 420 mm，相机曝光参数为 8 ms，组成的轮毂装卡位置精确测定系统，对同一偏转角度为 3° 的工件进行连续实际测量 40 次，测量结果如表 1 所示。

根据测量结果计算得出：

轮毂位置精确测定标准差 s ：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} = 0.0226^\circ \quad (2)$$

表 1 对同一偏转角度工件测量结果

| 次数 (n) | 角度 (x) | 处理时间/s | 次数 (n) | 角度 (x) | 处理时间/s |
|---------|--------|--------|---------|--------|--------|
| 1 | 2.963° | 0.27 | 21 | 2.991° | 0.22 |
| 2 | 2.961° | 0.21 | 22 | 3.038° | 0.35 |
| 3 | 3.032° | 0.28 | 23 | 2.986° | 0.36 |
| 4 | 3.046° | 0.26 | 24 | 2.978° | 0.38 |
| 5 | 3.022° | 0.31 | 25 | 3.009° | 0.35 |
| 6 | 3.042° | 0.32 | 26 | 3.017° | 0.30 |
| 7 | 2.993° | 0.25 | 27 | 3.001° | 0.29 |
| 8 | 3.012° | 0.38 | 28 | 2.983° | 0.23 |
| 9 | 3.025° | 0.40 | 29 | 2.969° | 0.43 |
| 10 | 2.974° | 0.31 | 30 | 3.015° | 0.38 |
| 11 | 2.987 | 0.20 | 31 | 2.986 | 0.34 |
| 12 | 2.977 | 0.34 | 32 | 2.993 | 0.28 |
| 13 | 3.027 | 0.21 | 33 | 3.023 | 0.39 |
| 14 | 3.023 | 0.28 | 34 | 2.974 | 0.27 |
| 15 | 3.008 | 0.28 | 35 | 2.984 | 0.22 |
| 16 | 2.990 | 0.30 | 36 | 3.026 | 0.18 |
| 17 | 3.023 | 0.39 | 37 | 3.038 | 0.33 |
| 18 | 3.032 | 0.24 | 38 | 2.971 | 0.28 |
| 19 | 2.962 | 0.25 | 39 | 3.003 | 0.32 |
| 20 | 3.018 | 0.36 | 40 | 2.989 | 0.26 |
| 最大误差 | | | 0.046° | | |
| 最小误差 | | | 0.001° | | |
| 角度平均值 | | | 3.002° | | |
| 角度标准差 s | | | 0.0226° | | |
| 平均处理时间 | | | 0.29s | | |

测量的标准不确定度 uA ：

$$uA = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0.0226}{\sqrt{40}} = 0.0036^\circ \quad (3)$$

轮毂位置精度误差要求 ±0.5°，根据实验数据计算得出轮毂位置精度测量最大误差 0.046°、标准差 0.0226°、A 类不确定度 0.0036°，均在理想范围之内，说明基于视觉检测技术的轮毂位置精度测定系统，能够满足轮毂位置精度检测的要求，并可快速重复测量，位移补差系统能够满足输出且系统处理时间较短，满足工业在线实时检测要求。若要进一步提高测量精度、系统的稳定性、缩短系统处理时间，还要对有关问题作更深入的研究，如定位相机像素、检测环境、镜头、光源的稳定性等。

应用现场实验应用视觉检测系统，辅助轮毂自动化加工 577 件电动车轻质合金轮毂，其中问题工件 55 件，一次加工产品合格率为 90.47%，经过对问题

工件的检测分析,产生问题原因全部为加工或卡具精度,轮毂位置精准测定全部符合要求,能够满足轮毂自动化加工检测定位需求。若要进一步提高加工效率,提高自动化加工稳定性,需对工装夹具、切削刀具、切削液、切削速度等进行深入研究。

5 结束语

为满足智能化生产需求,基于视觉检测技术的轮毂装卡位置精确测定,可以通过视觉系统,实现代替人眼及相应检测工具,自动检测获取测定结果,并对结果分析后输出,与机器人配合使用,可以克服传统的人工手动搬运和装卡的弊端,实现自动化加工,通过实验可证明该视觉系统,对轮毂位置精度的非接触式在线检测,具有精密高、稳定性好等特点,还能够提高轮毂位置精确测定效率,具有较高的应用价值,适合用于轮毂自动化加工中位置精度的测定。

视觉检测技术作为代替人眼和其他检测工具的智能化检测技术,因其高效率,非接触,高精度等特点,可以在定位检测、精度测量、位置测定等方面广泛应用,对工业自动化发展能够起到关键作用,符合未来工业智能化的发展方向,极具开发及研究价值。

参考文献:

- [1] 高晓勇,陈庚,陈金超. 基于工业以太网控制的铝合金轮毂锻造自动化生产线 [J]. 机械设计, 2018, 35 (s1): 407-410.
- [2] 李野. 基于工业机器人的轮毂柔性加工生产线的应用研究 [J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2021, 23 (2): 23-26.
- [3] 刘岩松,苗立刚,刘译彭. 基于环投影特征的汽车轮毂定位与识别 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (14): 73-77.
- [4] 程颖,李晓凡,朱宁. 基于机器视觉的刀具轮廓在线检测方法的研究 [J]. 光学技术, 2020, 46 (2): 167-172.
- [5] 吴凤和. 基于计算机视觉测量技术的图像轮廓提取方法研究 [J]. 计量学报, 2007 (1): 18-22.
- [6] 王宇杰. 基于机器视觉的塑料制品外观缺陷检测 [J]. 合成树脂及塑料, 2021, 38 (1): 93-96.
- [7] 沈宝国,梁佩佩,宦小玉,等. 基于机器视觉的工件角度检测方法研究 [J]. 机械设计与制造, 2016 (11): 230-232, 236.
- [8] 秦钟伟,陈捷,洪荣晶. 基于机器视觉的滚动轴承滚动体检测 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019

(1): 118-121.

- [9] 涂德浴,刘坤,朱庆,等. 基于机器视觉的钢管壁厚在线检测方法研究 [J/OL]. 计算机工程与应用: 1-9 [2021-05-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20210414.0903.004.html>.
- [10] 林新东,冉冲,钟织富,等. 基于机器视觉的固体发动机摆动喷管空间位姿的实时测量技术 [J/OL]. 固体火箭技术: 1-6 [2021-05-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1176.V.20210510.1728.004.html>.
- [11] SANTRA Bikash, SHAW Avishek Kumar, MUKHERJEE Dipti Prasad. An end-to-end annotation-free machine vision system for detection of products on the rack [J]. Machine Vision and Applications, 2021, 32 (3): 1-13.
- [12] HUANG Y M, YI M, YANG W H, et al. Research on Detection Method of Sheet Surface Defects Based on Machine Vision [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 632 (5): 7.
- [13] ZHOU Q X. A detection system for rail defects based on machine vision [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1748 (2): 5.
- [14] HUANG Z, FU H L, FAN X D, et al. Rapid surface damage detection equipment for subway tunnels based on machine vision system [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2021, 27 (1): 47.
- [15] BELAN Peterson Adriano, de Macedo Robson Aparecido Gomes, Alves Wonder Alexandre Luz, Santana José Carlos Curvelo, Araújo Sidnei Alves. Machine vision system for quality inspection of beans [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020 (111): 11-12.
- [16] KILLING J, SURGENOR B W, MECHEFSKE C K. A machine vision system for the detection of missing fasteners on steel stampings [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 41 (7-8): 808.
- [17] MANISH R, ADIGOPULA Venkatesh, DENIS Ashok S. Machine Vision Based Image Processing Techniques for Surface Finish and Defect Inspection in a Grinding Process [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5 (5): 11.
- [18] KEERTHANA S, SATHIYAKUMARI K. A Brief Study of Image Processing and Techniques [J]. Digital Image Processing, 2017, 9 (1): 3.