

基于机器视觉的航天器密封舱内结构 装配精度检测系统设计

庞学丰, 王瑞文, 张玉美, 赵超泽

(天津航天机电设备研究所, 天津 300457)

摘要: 目前航天器机械加工装配作业依赖人工操作, 影响航天器密封舱内结构装配精度, 为此, 设计了航天器密封舱内结构装配精度检测系统, 为高精度装配航天器密封舱内结构提供基础; 由于航天器密封舱内结构较为复杂, 为了保证使用电池供电时, 检测系统能够保持稳定可靠的工作模式, 应保证电池电量充足前提下, 系统发出预警信息, 以便工作人员及时采取相应解决措施; 在电池供电电路中, 设计欠电压电路监测形式, 该电路主要是由电压比较器 LM393 和 555 和谐振电路构成; 当电池供电量不足时, 谐振电路中的微电流高效率 650 nm 谐振腔发光二极管会出现闪烁报警信号; 以 STC89C52RC-40I-PDIP40 单片机中央控制单元为核心芯片, 检测航天器密封舱密封性能; 依据机器视觉检测原理, 使用非线性滤波算法增强图像, 避免外界噪声对图像采集结果造成影响, 滤除图像上若干白点; 设计检测流程可得到仪器板安装精度和设备安装支架装调检测结果; 由实验结果可知, 该系统对仪器板装配的检测误差为 0.001 mm, 对设备安装支架装调误差最大值为 0.05 mm, 精度较高, 能够为航天器密封舱内结构优化提供设备支持。

关键词: 机器视觉; 航天器; 密封舱内结构; 精度检测系统; 机械加工装配

Design of the Precision Detection System for the Assembly Accuracy of the Spacecraft Sealed Cabin Structure Based on Machine Vision

Pang Xuefeng, Wang Ruiwen, Zhang Yumei, Zhao Chaoze

(Tianjin Institute of Aerospace Mechanical and Electrical Equipment, Tianjin 300457, China)

Abstract: At present, the machining and assembly operations of spacecraft rely on manual operation, which affects the assembly accuracy of the structure inside the sealed cabin of the spacecraft. To this end, an assembly precision detection system for the spacecraft sealed cabin structure was designed to provide a basis for high-precision assembly of the spacecraft sealed cabin structure. Due to the complicated structure of the spacecraft's sealed cabin, in order to ensure that the detection system can maintain a stable and reliable working mode when using battery power, the system should issue an early warning message on the premise of sufficient battery power, so that the staff can take corresponding solutions in time. In the battery-powered circuit, the monitoring form of the under-voltage circuit is designed. The circuit is mainly composed of voltage comparators LM393 and 555 and a resonant circuit. When the battery power supply is insufficient, the micro-current high-efficiency 650nm resonant cavity LED in the resonant circuit will flash a warning signal. The STC89C52RC-40I-PDIP40 single-chip microcomputer central control unit is used as the core chip to test the sealing performance of the spacecraft sealed cabin. According to the principle of machine vision detection, a nonlinear filtering algorithm is used to enhance the image, to avoid the influence of external noise on the image acquisition result, and to filter out some white spots on the image. The testing process can be designed to obtain the test results of the installation accuracy of the instrument board and the installation and adjustment of the equipment mounting bracket. It can be seen from the experimental results that the detection error of the system for the assembly of the instrument board is 0.001 mm, and the maximum error for the installation of the equipment mounting bracket is 0.05 mm. The accuracy is high, which can provide equipment support for the optimization of the structure of the spacecraft sealed cabin.

Keywords: machine vision; spacecraft; sealed cabin structure; precision detection system; machining assembly

0 引言

我国航天事业发展迅速, 航天器密封舱内结构装配测量的难度也随之增加^[1]。航天器密封舱内结构装配精度检测贯穿于航天器各个测试阶段, 需要将位姿检测数据实时

反馈给工作人员用于结构精密调试, 尤其在力学检测阶段, 需先分析力学环境对设备安装位姿影响, 并在航天器结构实际运行测试阶段检测航天器结构变形后对安装具体位置的影响^[2-3]。采用人工检测方法是一种人为接触检测方法, 无法满足当代工业基础检测需求, 基于此, 提出了基于机器视觉的航天器密封舱内结构装配精度检测系统设计。机器视觉是一种非接触性检测方式, 在不影响航天器运行基础上, 被广泛用于航天器密封舱内结构非接触性检测之中。

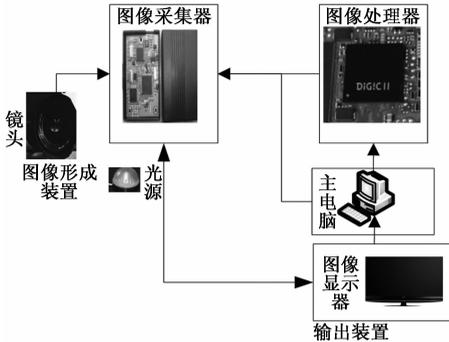
收稿日期: 2020-05-07; 修回日期: 2020-06-01。

作者简介: 庞学丰(1984-), 女, 山西晋中人, 大学本科, 工程师, 主要从事航天器机械加工装配工艺方向的研究。

1 系统总体结构设计

基于机器视觉的航天器密封舱内结构装配精度检测系统工作过程主要包括：首先由镜头、相机、图像采集卡构成的图像采集器采集被检测目标图像，通过模数转换后将图像转变为数字信号形式，再经过图像处理环节，提取像素分布、亮度与颜色特征信息^[4]。之后再根据预先设定的输出判别结果，去控制驱动执行机构。

系统总体结构设计如图 1 所示。



在图 1 所示的总体结构支持下，分别设计机器视觉光源单元、电源单元、图像采集器单元及密封性检测单元。

1.1 光源单元设计

在装配精度检测系统中，光源直接决定着成像质量，对最终检测结果具有较大的影响^[5]。针对航天器密封舱内结构装配精度检测，应使用微电流高效率 650 nm 谐振腔发光二极管作为照明装置，该装置主要是由上、下分布布拉格反射镜、谐振腔组成，微腔效应改变了电磁场模式结构，增大了波长光模式密度，因此，微电流高效率 650 nm 谐振腔发光二极管比普通 LED 灯光效率更高^[6]，谐振腔发光二极管具有稳定波长^[7]。光源实际安装位置如图 2 所示。

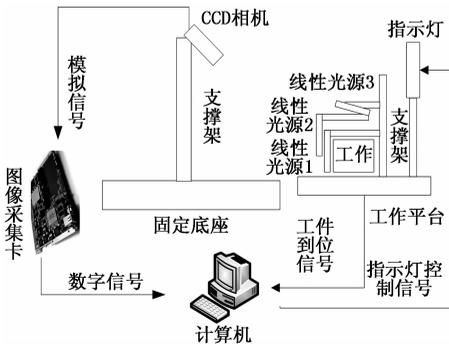


图 2 光源的安装位置

为满足实际检测需求，共适配 3 个线性光源，其中 1、2 线性光源分别以一定角度照射侧边引脚，3 光源垂直照射批号区域^[8]。确定像素分布、亮度与颜色特征信息后，根据系统总体结构，使用微电流高效率 650 nm 谐振腔发光二极管作为照明装置，设计机器视觉光源单元；选择 4NIC—UPS27 型号二体化不间断供电模式为系统提供电源，设计

电源单元；利用外置 USB 的 T1001UHS HDMI/SDI 采集器，缩短数据访问时间，并借助复杂可编程逻辑器件独立完成采集功能。

1.2 电源单元设计

电源单元是整个检测系统的电能来源，在该检测系统中，设计交直流两种型电源，既可以使用 36 V 直流供电形式，也可有使用 220 V 交流供电形式^[9]。为了提高系统抗干扰能力，在下位机检测装置中，应选择 4NIC—UPS27 型号二体化不间断电源，该电源功率密度大、抗干扰性强，同时，该电源能够实现交直流电在 0~0.5 s 内快速切换，适用于不同设备供电需求。当使用电池供电模式时，就可以电池为主电源，也可将其作为后备电源^[10-11]。

1.3 图像采集单元设计

图像采集单元是利用现代化技术实时采集图像信息，图像采集在数字处理、识别领域应用较为广泛。以往图像采集是利用采集卡将 CCD 摄像机模拟视频信号经过 A/D 转换后存储的，然后再传送到计算机内进行处理。虽然该设备简便，但存在转换数据不精准问题，造成数字化视频图像质量较差，且分辨率较低。因此，选择外置 USB 的 T1001UHS HDMI/SDI 采集器，带 1 路 HDMI 环出和音频输出，可接大屏、电视机等显示设备，1 路 3.5 音频输出接口，可接耳机或音箱，使操作者能够实时监测图像画面^[12]。外置 USB3.0 接口，传输速度快、延迟小，是 USB2.0 输出速度的 10 倍^[13]。

在高速图像采集处理过程中，需要使用速记存储器缩短数据访问时间。控制采样图像传感器，可以使用 FPGA，控制图像传感器采样，并控制 SRAM，待图像采集完成后，需要借助复杂可编程逻辑器件独立完成采集功能^[14]。

1.4 密封舱性能检测单元设计

在密封舱密封性能检测单元中，嵌入式计算机系统智能仪器包括 V500PRO 键盘、显示页面、LOEASE 计时模块、A/D 转换模块、My Cloud EX2 Ultra 数据存储器、M02S 微型打印机、看门狗及输入/输出控制接口，在密封性检测单元中，可用于各部分功能的进一步扩展。密封舱性能检测单元设计如图 3 所示。

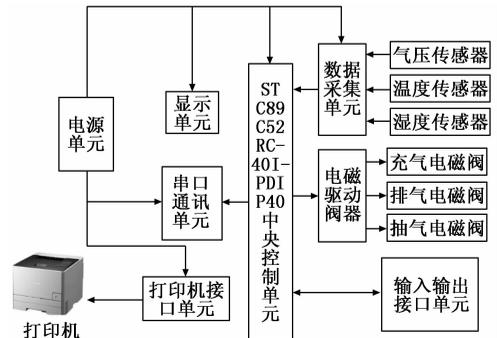


图 3 密封舱性能检测单元

在光源单元和电源单元支持下，根据嵌入式系统所要实现功能，以 STC89C52RC—40I—PDIP40 单片机中央控

制单元为核心芯片, 分析各个性能指标, 以此检测密封舱密封性能。

2 基于机器视觉软件部分设计

在设计了系统总体结构及密封舱性能检测单元的基础上, 依据机器视觉检测原理, 对采集到的航天器密封舱体装配图像进行预处理, 并设计仪器板装配检测流程及设备安装支架装调检测流程, 由此完成航天器密封舱内结构装配精度检测系统软件设计。

2.1 机器视觉检测原理

机器视觉检测原理如图 4 所示。

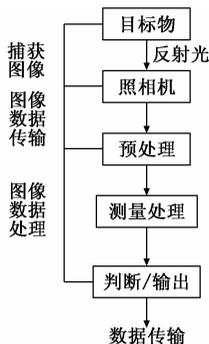


图 4 机器视觉检测原理

由图 4 可知: 该检测过程所需设备包括光源、工件、镜头、相机、采集卡及图像处理软件等。机器视觉是使用机器人代替人眼测量与判断的, 通过机器视觉将采集到的图像转换为信号形式, 再传递给专用图像处理软件之中, 根据像素亮度、颜色指标, 将其转换为数字化信号形式。根据目标特征检测密封性, 以此控制航天器现场动作。

2.2 图像预处理

在进行图像采集过程中, 不可避免会受到外界噪声影响, 因此, 需对图像进行预处理, 如图 5 所示。

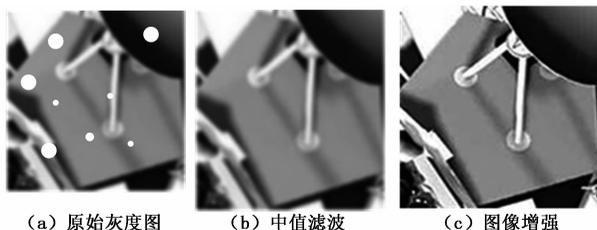


图 5 预处理效果图

以图 5 (a) 所示的零件为基础, 需要获取特征信息包括具体大小及位置坐标。在该零件上存在若干个白点, 即为噪声, 为了避免该噪声对图像采集结果造成影响, 需使用非线性滤波算法增强图像, 计算公式如下所示:

$$Z_{ij} = (S_{ij} - Mean) * \lambda + S_{ij} \quad (1)$$

式 (1) 中, Z_{ij} 为图像经过增强处理后的序列; S_{ij} 为图像在未进行增强处理前图像序列; λ 为比例系数; Mean 为求数组平均值的函数; ij 为图像序列。

在去除噪声的同时, 使用非线性滤波算法还能保持图

像边缘信息, 使图像变得更加清晰, 也从图中可看出, 原始图像上若干白点被滤除。

2.3 仪器板装配检测流程

- 1) 航天器密封舱体停放到指定工位;
- 2) 使用激光跟踪仪构建激光雷达联合站;
- 3) 航天器整舱基准是由激光跟踪仪转换到激光雷达上;
- 4) 在舱体前端设置检测点, 将整舱基准转移至舱体前端;
- 5) 仪器板初步装配后, 激光雷达通过测量前测点, 恢复整舱基准;
- 6) 精测仪器板, 获取需要检测的装配数据;
- 7) 检测装配数据, 装配调整垫片;
- 8) 测量前端测点, 恢复整舱基准;
- 9) 复测仪器板, 检测装配精度, 若不满足, 则需重新调整。

通过检测流程, 可以得到仪器板安装精度数据, 并由此及时检测出仪器板装配精度。

2.4 设备安装支架装调检测流程

在仪器板装配检测完成后, 进一步对设备安装支架进行装调检测, 此时仪器板完全固定, 具有良好承载力, 不会因为支架安装影响自身精度。设备安装支架的装配检测流程, 如下所示:

- 1) 将设备安装支架安装到位, 以此为基准, 构建激光跟踪仪构建激光雷达联合站;
- 2) 航天器整舱基准是由激光跟踪仪转换到激光雷达上, 在舱体前端设置检测点, 采用激光雷达扫描点将整舱基准转移到舱体前端, 完成仪器板初步装配后, 激光雷达通过测量前测点, 恢复整舱基准 (该步骤与仪器板的装配检测步骤一致);
- 3) 根据支架精测数据逆向建模, 并编制数据加工程序;
- 4) 拆除设备安装支架, 离线加工设备安装接口;
- 5) 复位设备安装支架, 复测支架接口精度;
- 6) 检测后需重新安装设备支架。

依据该流程, 可实现设备安装支架装调检测。

3 实验结果与分析

为验证基于机器视觉的航天器密封舱内结构装配精度检测系统设计合理性, 进行实验分析, 采用 MATLAB 仿真软件作为实验平台, 大型密封舱的结构如图 6 所示。

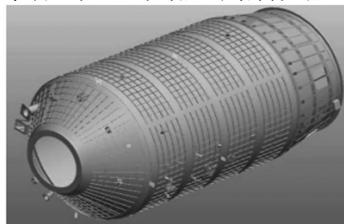


图 6 航天器密封舱结构示意图

图 6 中密封舱开口主要位于密封舱左侧，整个舱内结构含有大量仪器板，并且个别仪器板安装接口精度要求较高，测量极其困难。因此，需先统计密封舱数据表，如表 1 所示。

表 1 密封舱数据表

检测时间	气压/MPa	温度/℃	湿度/RH%	保压计时/min	充气电磁阀	排气电磁阀
2:10	0.05	20.0	50	0	ON	OFF
2:11	0.06	20.5	50	0	ON	OFF
2:12	0.06	20.0	48	0	ON	OFF
2:13	0.08	20.2	48	0	ON	OFF
2:14	0.09	20.0	46	0	ON	OFF
2:15	0.10	20.0	46	0	ON	OFF
2:16	0.11	20.1	49	0	ON	OFF
2:17	0.11	20.2	49	1	OFF	OFF
2:18	0.13	20.2	48	1	OFF	OFF
2:19	0.13	20.3	47	1	OFF	OFF
2:20	0.13	20.3	47	1	OFF	OFF

气压限值为 0.08~0.12 MPa、湿度上限设定值 15RH%、保压计时 45 min

航天器密封舱内结构精密装调技术是为了解决舱内半开放环境下，内结构精密装调过程所遇到的难题而进行的装配工艺研究。因此，在对系统检测验证时，应从仪器板和支架两方面装调检测进行验证分析。

3.1 仪器板装配检测

针对仪器板精测数据分析，安装调整垫片使其满足仪器板精装需求，消除因板面变形而带来装配应力。

垫片示意图如图 7 所示。

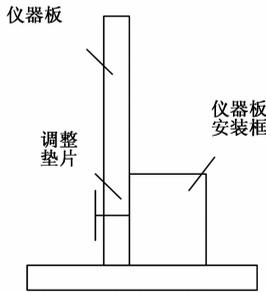


图 7 调整垫片安装示意图

根据图 7 所示的安装方式调整垫片后，仪器板装配精度数据如表 2 所示。

表 2 仪器板装配精度实测值

编号	项目	基准	标准值/mm	实测值/mm	备注
M1	板面与 A 面平行度	A	0.4	0.33	合格
M2	板边与 B 基准平行度	B	0.3	0.25	合格
M3	板边与 C 基准平行度	C	0.3	0.16	合格
M4	板边距 B 基准距离	B	±0.5	0.02	合格
M5	板边距 C 基准距离	C	±0.5	0.21	合格

在表 2 所示数据支持下，分别采用人工检测和机器视

觉检测系统对仪器板装配精度检测，如图 8 所示。

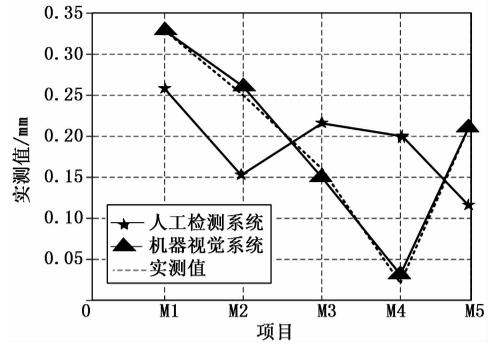


图 8 两种系统对仪器板装配精度检测

由图 8 可知：使用人工检测系统检测值与实测值相差较大，尤其在项目 M4 处相差最大，在 M1 处相差最小。产生这种现象的主要原因是人工检测系统采用接触式检测方式，使检测的结果添加了人为因素，导致检测结果不精准。而使用机器视觉系统采用非接触式检测方式，避免人为因素影响，具有良好检测结果，在项目 M1、M5 处与实测值大小一致，在其余三处与实测值相差较小，基本保持在 0.001 mm 检测误差。

3.2 设备安装支架装调检测

航天器密封舱平面上部为支座实际加工余量，其特征能够真实反映出航天器密封舱内结构状态，如图 9 所示。

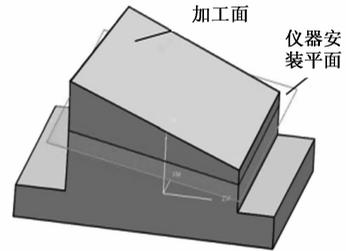


图 9 支座的实际平面与理论平面位置关系

确定加工位置后，开展数控编程，按照装调流程完成调试后，设备安装支架装调精度指标达到设计标准，如表 3 所示。

表 3 设备安装支架装配精度实测值

编号	项目	基准	标准值/mm	实测值/mm	备注
M6	安装面与 A 基准平行度	A	0.2	0.1	合格
M7	安装面平面度	—	0.1	0.05	合格

在表 3 所示的数据支持下，分别采用人工检测和机器视觉检测系统对设备安装支架装配精度检测，如表 4 所示。

由表 4 可知，使用人工检测系统依然存在人工干预问题，导致检测结果与实测值存在较大误差。而使用机器视觉系统没有人工干预问题，检测结果与实测值相差较小。虽然人工检测系统受到人工干预影响，但检测值与实测值最大误差为 0.05 mm，说明对于设备安装支架装配精度检

测无论哪种系统都具有良好检测效果。

表 4 两种系统对设备安装支架装配精度检测

编号	项目	基准	检测值/mm
人工系统			
M6	安装面与 A 基准平行度	A	0.05
M7	安装面平面度	—	0.02
机器视觉系统			
M6	安装面与 A 基准平行度	A	0.12
M7	安装面平面度	—	0.05

3.3 结果分析

通过上述实验结果分析可知, 航天器密封舱内结构装配精度检测系统主要用于检测仪器板装配及设备安装支架装调两方面。在仪器板装配检测中, 所设计系统检测结果与实测值基本保持 0.001 mm 左右的检测误差; 在设备安装支架装调检测中, 所设计系统检测结果与实测值最大误差为 0.05 mm。所设计系统的装配检测准确度高, 能够应用于航天器密封舱内结构装配精度检测中, 实现航天器密封舱内结构精准装配。

4 结束语

机器视觉技术是一种新兴技术, 能够代替人眼检测, 具有精准度高、实时检测的特点。就目前来说, 大部分生产商采用机器视觉检测技术代替人工检测技术, 避免误检、漏检现象发生。针对航天器密封舱内结构精准装配检测需先了解运行现场环境, 设定具体检测标准。

航天器密封舱内结构精准装配检测依赖因素较多, 但制造业需求元素是具有决定性的。结构精准装配对机器视觉需求提升决定了检测技术由以往单纯采集、分析逐渐朝着开放性方向发展, 这一趋势也决定了机器视觉将与自动化技术完美融合。在未来, 随着航天器对产品高质量需求越来越高, 机器视觉将成为广泛用武之地。

(上接第 52 页)

[10] Jing J F, Wang J, Li P F, et al. Automatic classification of woven fabric structure by using learning vector quantization [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 15 (8): 5005-5009.

[11] 董燕, 朱永胜, 张晓慧. DFT 及多投影分析的织物纬斜检测方法研究 [J]. *计算机仿真*, 2013, 30 (8): 393-397.

[12] 刘葵. 基于多阈值分析的织物图像倾斜检测方法 [J]. *计算机仿真*, 2011, 28 (2): 333-336, 387.

[13] Furnari A, Farinella G M, Bruna A R. Distortion adaptive Sobel filters for the gradient estimation of wide angle images [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2017, 46 (7): 165-175.

[14] Zhang K, Zhang Y, Wang P, et al. An improved Sobel edge algorithm and FPGA implementation [J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 131 (4): 243-248.

[15] Rao P S, Yrdukondalu K. Hardware implementation of digital image skeletonization algorithm using FPGA for computer vision applications [J]. *Journal of Visual Communication and*

参考文献:

[1] 章朋田, 黄宁, 张所来, 等. 航天器空间曲线焊缝 VPPA 自动化焊接装备开发和应用 [J]. *焊接*, 2018, 4 (5): 52-55.

[2] 刘宣宇, 张凯举, 邵诚. 基于数据驱动的盾构机密封舱土压预测 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44 (9): 2898-2904.

[3] 李芳, 敬兴久, 蒲洁. 充/抽气参数对密封舱气体置换性能的影响 [J]. *机床与液压*, 2019, 3 (10): 89-91.

[4] 关晓辉, 周林. 密封舱气体置换过程仿真与分析研究 [J]. *系统仿真学报*, 2018, 8 (1): 114-121.

[5] 郭文杰, 王立凯, 聂小华, 等. 航天器多舱段多组件结构系统整体式拓扑布局优化设计 [J]. *导弹与航天运载技术*, 2019, 7 (5): 33-39.

[6] 张在房, 林炜, 程辉, 等. 基于数字孪生的航天器舱门展收机构优化设计 [J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25 (6): 1371-1380.

[7] 李青, 邢立坤, 柏江, 等. 航天器噪声试验中结构振动响应预示方法研究 [J]. *力学学报*, 2019, 51 (2): 569-576.

[8] 柳荣, 渠涛, 王申, 等. 基于三维结构光扫描技术的航空橡胶密封件平整度测试与分析 [J]. *实验力学*, 2019, 8 (4): 583-590.

[9] 李会通, 司江舸, 程龙. 一种海洋平台用新型舱底阀改型设计 [J]. *船海工程*, 2019, 4 (3): 108-111.

[10] 解维华, 韩国凯, 孟松鹤, 等. 返回舱/空间探测器热防护结构发展现状与趋势 [J]. *航空学报*, 2019, 40 (8): 1-17.

[11] 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, 4 (1): 118-121.

[12] 刘俊博, 黄雅平, 王胜春, 等. 基于机器视觉的多线路钢轨扣件缺损检测方法 [J]. *中国铁道科学*, 2019, 9 (4): 27-35.

[13] 刘超, 石锦成, 刘林琳, 等. 基于 LabVIEW 机器视觉在继电器检测系统中的应用研究 [J]. *仪表技术与传感器*, 2019, 5 (4): 52-55.

[14] 陈威. 机器视觉系统超分辨率图像准确识别方法研究 [J]. *微电子学与计算机*, 2019, 4 (6): 105-108.

[15] Image Representation, 2019, 59 (2): 140-149.

[16] Andrearczyk V, Whelan P F. Convolutional neural network on three orthogonal planes for dynamic texture classification [J]. *Pattern Detection*. 2018, 76 (4): 36-49.

[17] Egozi A, Dinstein I. Statistical Mixture model for documents skew angle estimation [J]. *Pattern Detection Letters*. 2011, 32 (10): 1912-1921.

[18] Verma R N, Malik D L. Review of illumination and skew correction techniques for scanned documents [J]. *Procedia Computer Science*. 2015, 45 (3): 322-327.

[19] Zheng Y, Xia B X. High precision fast line detection of alignment and coupling for planar optical waveguide device [J]. *Optik*, 2017, 145 (9): 519-528.

[20] Boudraa O, Hidouci W K, Micheluci D. Using skeleton and Hough transform variant to correct skew in historical documents [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2020, 167 (1): 389-403.