利用铜丝验证机器视觉设备精度的可靠性研究

周曼霞,林海涛*

广西科技大学生物与化学工程学院, 广西 柳州

收稿日期: 2025年3月2日; 录用日期: 2025年3月25日; 发布日期: 2025年4月3日

摘要

本研究基于机器视觉原理构建铜丝直径检测系统,通过标准化实验流程验证设备精度。检测系统由图像 采集与处理两大核心模块构成,采用高分辨率工业相机配合专业级单远心镜头,在精密校准的显微视野 范围内实现微米级测量精度。针对传统方法中机械定位引起的测量误差,本研究通过固定光学成像距离 有效控制检测环境变量。实验选用多规格标准铜丝样本,结合接触式精密量具与视觉检测系统进行对比 分析。在标准化操作流程中,物理测量采用多点密集采样取均值作为基准数据,同步进行的非接触式检 测则通过多方位图像捕捉与智能算法提取特征参数。通过建立基准数据与视觉检测值的数学模型,最终 验证了该视觉系统在精度指标与重复性方面均达到工业检测标准要求,证实了该检测方案在微细线材质 量管控中的实用价值。

关键词

机器视觉,精度,单远心镜头,工业相机,铜丝

Study on Reliability of Accuracy Verification of Machine Vision Equipment Using Copper Wire

Manxia Zhou, Haitao Lin*

School of Biological and Chemical Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou Guangxi

Received: Mar. 2nd, 2025; accepted: Mar. 25th, 2025; published: Apr. 3rd, 2025

Abstract

This study establishes a copper wire diameter inspection system based on machine vision principles, with equipment accuracy validated through standardized experimental protocols. The detection

*通讯作者。

system comprises two core modules: image acquisition and processing, achieving micrometer-level measurement accuracy within a precisely calibrated microscopic field of view through the integration of a high-resolution industrial camera and professional-grade single telecentric lens. Addressing measurement errors caused by mechanical positioning in traditional methods, this research effectively controls environmental variables through fixed optical imaging distance. Experimental verification employs multi-specification standard copper wire samples for comparative analysis between contact-based precision measuring tools and the vision-based inspection system. Under standardized operational procedures, physical measurements adopt multi-point dense sampling with averaging as reference data, while the non-contact detection simultaneously performs multi-angle image capture and feature parameter extraction through intelligent algorithms. By establishing a mathematical model between reference data and vision-derived measurements, the results confirm that the visual system meets industrial inspection standards in both precision metrics and repeatability, demonstrating its practical value in quality control of micro-diameter wire materials.

Keywords

Machine Vision, Accuracy, Single Telecentric Lens, Industrial Camera, Copper Wire

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

铜丝作为人类文明进程中最早开发利用的金属材料之一,是以高纯度铜或铜合金为原料,通过精密 拉丝工艺制成的标准化线材[1]。其独特的导电性、延展性和环境稳定性,使其从古老的工艺制品演变为 现代工业的核心基础材料,广泛应用于电力传输、电子元器件、建筑结构及高端装备制造领域。相较于 纺织纤维等有机材料,铜丝在几何精度、机械强度和环境适应性方面具有显著优势——直径波动率低于 0.5%、表面粗糙度控制在微米级,且在温湿度变化下几乎不发生形变[2]。这种高度稳定的物理特性不仅 满足了工业制造对材料一致性的严苛要求,更使其成为机器视觉检测系统的较理想标定介质,为精密测 量技术提供了可行性方案。

2. 机器视觉检测设备的原理及选择

机器视觉作为仿生视觉系统的工程技术,通过光学成像装置与数字图像处理算法的协同作用,实现 对视觉信息的智能化解析。该技术体系主要包含光学成像与数字处理两大核心模块,其理论基础涵盖应 用光学、计算机视觉和模式识别等多个交叉学科[3]。

2.1. 光学成像模块的构建

成像系统采用 200 万像素面阵相机(分辨率 1600×1200)配合四倍放大倍率的单远心镜头,构建 1.785 mm×1.339 mm 显微视野。系统标定采用标准影像仪校准块,经多点位校准验证,空间解析精度达到 1.1155 μm。远心光路设计有效抑制了透视畸变,确保测量对象在景深范围内保持稳定的放大倍率[4]。

2.2. 数字图像处理流程

本设备使用 OpenCV 库对图像进行处理,步骤主要有 3 步: 第一步进行平滑处理,减小图像噪声;

第二步是对图像进行阈值分割; 第三步是采用轮廓检测及缩小阈值的方法, 提取铜丝的主干直径。

在技术验证方法学层面,现有研究存在可优化空间。以苏州大学闫冠宇、潘青田[5][6]生丝检测设备 验证为例,其采用铜丝作为标定参照物时,通过机械位移调整成像清晰度的操作方式违背了光学系统的 最佳物距原则。这种人为干预可能导致离焦引起的边缘模糊效应,继而影响直径测量精度。

3. 铜丝标准化检测样本的构建与验证方法

3.1. 试样制备

选取 0.1 mm 和 0.2 mm 两种标称直径的退火铜线各 1 米作为实验样本。根据 GB/T 21652-2008《铜 及铜合金线材》标准要求,样本表面需进行清洁处理以消除氧化层影响[7]。

3.2. 仪器配置

实验采用工业级视觉检测装置,由长风纺织机电科技有限公司提供,配置参数如下:检测平台物距固定于 65 mm,选用 4.4 μm 像元尺寸的 CCD 工业相机配合 4 倍光学放大远心镜头构成成像系统。理论测量精度可计算为:像元尺寸(4.4 μm)/放大倍率(4) = 1.1 μm,空间解析精度达到 1.1155 μm。

3.3. 图像获取与参数记录

通过自动化扫描平台对试样进行随机采样,同步记录几何特征参数(线径尺寸、像素值)。检测过程保 持环境温度(23 ± 1)℃、相对湿度 50% ± 5%的恒温恒湿条件。

3.4. 测量系统精度验证

为验证理论精度与实际测量值的一致性,采用双重验证方案。

3.4.1. 基准值测定

选用两种标准直径的铜质线材作为基准样本,各规格样本分别获取 30 组有效数据。数据处理时采用 格拉布斯准则剔除异常值,最终以算术平均值作为基准直径 X (见表 1、表 2)。

3.4.2. 视觉系统标定

在恒定成像参数下,通过图像分析软件对样本进行亚像素轮廓检测。每种规格试样选取 15 个典型截面,经形态学滤波处理后统计有效像素值 Y (见表 3、表 4)。特别注意消除照明不均匀导致的边缘模糊现象,确保信噪比 ≥45 dB。

3.4.3. 系统误差分析

计算实际测量精度 A = X/Y,该参数表征单像素对应的物理尺寸量。当|A-1.1 μm|≤0.05 μm 时,判 定系统满足设计精度要求。

4. 实验结果及分析

以下实验结果使用 SPSS 软件进行分析。

Table 1. Diameter test results of 0.1 mm copper wire (unit: μm) 表 1. 0.1 mm 铜丝直径测试结果(单位: μm)

位置	直径	位置	直径
位置	108	位置 16	115

续表				
位置1	107	位置 17	112	
位置 2	112	位置 18	110	
位置 3	108	位置 19	115	
位置 4	112	位置 20	119	
位置 5	106	位置 21	114	
位置 6	113	位置 22	108	
位置 7	108	位置 23	108	
位置 8	107	位置 24	114	
位置 9	112	位置 25	107	
位置 10	116	位置 26	114	
位置11	114	位置 27	109	
位置 12	109	位置 28	113	
位置 13	110	位置 29	109	
位置 14	112	位置 30	107	
平均值		110.9	93	
方差	方差		10.961	
标准差	<u>_</u>	3.310	73	
平均值的 95%置	平均值的 95% 置信区间上限 112.169		596	
平均值的 95%置	信区间下限	109.69	071	

周曼霞,林海涛

Table 2. Diameter test results of 0.2 mm copper wire (unit: μm) 表 2. 0.2 mm 铜丝直径测试结果(单位: μm)

位置	直径	位置	直径
位置1	211	位置 16	211
位置 2	215	位置 17	219
位置 3	211	位置 18	226
位置 4	222	位置 19	224
位置 5	221	位置 20	209
位置 6	233	位置 21	212
位置 7	207	位置 22	209
位置 8	218	位置 23	212
位置 9	222	位置 24	220
位置 10	206	位置 25	218
位置 11	210	位置 26	238
位置 12	218	位置 27	214
位置 13	213	位置 28	221
位置 14	216	位置 29	207

续表				
位置 15	213	位置 30	216	
平均值		216.4		
方差		55.766		
标准	差 7.46763		63	
平均值的 95%置信区间上限		219.1885		
平均值的 95%置信区间下限		213.6115		

Table 3. Pixel values of 0.1 mm copper wire
表 3. 0.1 mm 铜丝像素值

位置	像素值
位置1	97
位置 2	102
位置 3	98
位置 4	96
位置 5	98
位置 6	99
位置 7	97
位置 8	98
位置 9	95
位置 10	97
位置 11	102
位置 12	99
位置 13	97
位置 14	100
位置 15	98
平均值	98.2
方差	3.886
标准差	1.97112
平均值的 95%置信区间上限	99.2916
平均值的 95%置信区间下限	97.1084

Table 4. Pixel values of 0.2 mm copper wire 表 4. 0.2 mm 铜丝像素值

位置	像素值
位置1	187
位置 2	191
位置3	187
位置4	196

续表	
位置 5	196
位置 6	194
位置7	204
位置 8	185
位置 9	194
位置 10	185
位置11	188
位置 12	193
位置 13	190
位置 14	191
位置 15	190
平均值	191.4
方差	25.257
标准差	5.02565
平均值的 95%置信区间上限	194.1831
平均值的 95%置信区间下限	188.6169

由表 1~4 以及公式 A = X/Y 可得结果, 见表 5。

 Table 5. Accuracy of 0.1 mm and 0.2 mm copper wire

 表 5. 0.1 mm、0.2 mm 铜丝精度

铜丝类型	直径平均值(μm)	像素平均值	精度(µm)
0.1 mm 铜丝	110.93	98.2	1.129
0.2 mm 铜丝	216.4	191.4	1.130

由表 5 可知,通过两种规格铜丝的对比实验,相机实测精度与理论精度值 1.1 μm 呈现出高度一致性。 实验数据显示,虽然铜丝实际直径存在微米级差异,但由此产生的精度偏差处于可接受阈值内,未对最 终检测数据的准确性构成实质影响。直径出现误差的原因可能是因为实验时是定点拍摄,铜丝并没有被 牵拉,导致铜丝并没有水平向下,有一定的倾斜,而直径的获取是按照像素点来计算,倾斜程度越高, 单行所占像素点就越多。为避免过多的误差,检测设备可以使用罗拉装置将铜丝拉回水平位置上,从而 提高设备精度。该结果表明当前检测系统在工业应用场景中具备足够的测量精度保障,同时印证了采用 标准铜丝作为标定介质对机器视觉系统进行精度验证的方法有效性。

5. 结论与展望

本研究为机器视觉纤维检测设备的校准策略与性能优化提供了可行性方案。实验结果表明,采用铜 丝作为标准测试物可有效验证基于机器视觉的线材检测设备的测量精度,其方法具有显著的可重复性和 稳定性。这种基于标准试样的评估体系不仅能够系统量化设备的关键性能指标,更为检测系统的参数优 化建立了数据驱动的改进路径。在后续研究中,可将测试对象拓展至铜材的不同形态(如铜块、铜片等)及 其他材料,通过建立多维度的标准样本库,进一步提升机器视觉检测系统的泛化能力和工业适用性。本 研究构建的检测范式因其兼具方法简便性与结果可靠性,为工业视觉检测装备的性能评估与迭代升级提供了可推广的技术方案。

参考文献

- [1] 张海东, 杜锦彪. 大电流柔性母线的研发与应用[J]. 建筑电气, 2024, 43(7): 60-64.
- [2] 章朝哲. 铜基一维柔性超级电容器电极材料的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛科技大学, 2023.
- [3] 谭华泰, 王腾飞. 基于机器视觉的构件几何信息检测系统研究[J]. 机电信息, 2025(4): 31-36.
- [4] 朱鹏程, 凌步军, 沈店祥, 等. OLED 柔性面板激光切割设备中视觉定位与检测系统的设计与实现[J]. 科技视界, 2024, 14(31): 62-64.
- [5] 闫冠宇. 基于机器视觉的生丝外观质量电子检测研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州大学, 2020.
- [6] 潘青田. 基于双目视觉的生丝匀度及结构紧密度检测系统研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州大学, 2018.
- [7] 郝媛媛. 纺织结构散热器织造工艺及质量评价体系构建[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2016.