

# 基于机器视觉的机械零件尺寸与形状精度检测实验

王艳丽

丹东市技师学院 辽宁丹东 118001

**摘要:**传统机械零件检测方法存在效率低、精度不足等问题,难以满足现代工业自动化需求。本文基于机器视觉技术,提出一种机械零件尺寸与形状精度的自动化检测方案。通过搭建实验系统,结合图像采集、处理与分析流程,利用特征提取算法获取零件轮廓与几何参数,实现非接触式高精度测量。实验表明,该系统可有效识别零件的尺寸偏差与形状误差,具备较好的稳定性和实用性。研究结果为工业检测提供了高效、低成本的自动化解决方案,对提升精密制造领域的质量控制水平具有参考意义。

**关键词:**机器视觉;尺寸检测;形状精度;工业自动化;图像处理

## 引言

随着机械制造行业向智能化方向加速转型,零件尺寸与形状的检测精度直接关系到产品质量与生产效率。传统接触式测量方法依赖人工操作,存在效率低、易损伤工件表面、难以适应复杂形状检测等问题,尤其在批量生产中难以满足实时性要求。与此同时,机器视觉技术凭借非接触、高速度、高灵活性的优势,逐渐成为工业检测领域的研究热点。通过将光学成像与计算机处理技术结合,机器视觉不仅能够实现微米级精度的快速测量,还可与自动化生产线无缝对接,为智能制造提供了新的技术路径。

本研究以提升中小型机械零件的检测效率与精度为核心目标,探索基于机器视觉的自动化检测方案。通过搭建非接触式光学检测系统,结合图像处理算法,构建从数据采集到误差分析的全流程检测模型。重点解决零件表面特征提取、几何参数计算及测量精度验证等关键技术问题,旨在为工业现场提供一套低成本、易部署的检测方法,同时为传统制造企业向智能化升级提供技术参考。

## 一、相关技术基础

机器视觉检测系统的核心在于硬件配置与算法设计的协同优化。硬件层面,工业相机的选型需综合考虑分辨率、帧率与视场范围的平衡,例如采用全局快门相机避免运动模糊,配合高精度光学镜头确保成像清晰度。

光源设计直接影响图像质量,背光照明适用于轮廓分明的零件测量,而同轴照明则能有效减少表面反光干扰,二者可根据零件材质与检测需求灵活选择。图像采集后需进行预处理,包括去噪、灰度化、对比度增强等操作,为后续分析提供高质量数据基础。

算法开发是实现高精度检测的关键。边缘检测技术通过Canny算子或Sobel算子定位零件轮廓,结合亚像素插值算法可将定位精度提升至像素级以下。在获取轮廓信息后,基于最小二乘法的几何特征拟合技术可精确计算零件的直径、圆度、直线度等参数。此外,坐标系的标定与尺寸换算需通过标定板或已知尺寸的标准件完成,以消除镜头畸变与透视误差对测量结果的影响。这些技术的综合应用,使得机器视觉系统能够替代传统测量工具,在非接触条件下实现快速、精准的自动化检测。

## 二、系统设计与实现

实验平台搭建以实用性为导向,兼顾成本与精度要求。硬件系统采用高分辨率工业相机搭配远心镜头,确保在固定视场内获取无畸变的清晰图像,配合可编程运动平台实现多角度拍摄。光源系统选用LED阵列背光与环形同轴光组合方案,通过调节亮度和照射角度,可适应不同材质零件的轮廓增强需求。机械夹具采用模块化设计,配备精密定位销与气动夹爪,既保证零件姿态固定,又便于快速更换检测对象。软件层面基于Python语言搭建,利用OpenCV库实现图像处理核心功能,结合PyQt设计人机交互界面,形成从图像采集到结果输出的完整工作流。

检测流程开发围绕标准化与自动化展开。图像采集

**作者简介:**王艳丽(1970.12——),女,满,辽宁省丹东市人,本科学历,机械实验师。

阶段通过预设曝光时间、增益参数及拍摄位姿，确保不同批次零件的成像一致性。自动对焦模块基于图像清晰度评价函数，通过驱动运动平台微调相机高度，直至获取最大梯度值图像。特征提取环节采用多尺度边缘检测算法，结合形态学处理消除噪声干扰，精准提取零件内外轮廓。几何参数计算阶段，基于最小二乘法对轮廓点集进行圆、直线等几何要素拟合，并通过像素当量标定将图像坐标转换为实际尺寸。数据输出模块将检测结果与公差范围自动比对，生成包含偏差数值及合格判定的检测报告，支持与工厂MES系统对接。

整个系统通过软硬件协同优化，在保证检测精度的同时，将单件检测时间控制在10秒以内。实验表明，模块化设计使系统具备良好的扩展性，通过调整光源配置与算法参数，可快速适配不同规格零件的检测需求，为实际工业场景中的柔性化检测提供了可行方案。

### 三、实验设计与验证

为全面评估机器视觉检测系统的综合性能，实验设计围绕准确性、重复性和环境适应性三个维度展开。测试样本选取遵循工业典型性原则，包含直径10–50mm的45#钢制轴类零件、孔径6–30mm的铝合金孔类零件，以及厚度5–20mm的不锈钢平面类零件，三类样本表面分别进行磨削、铣削和冲压加工，覆盖常见机械加工工艺特征。所有样本预先通过三坐标测量仪（CMM）进行基准值标定，确保检测结果对比的可靠性。实验环境控制在温度（ $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ）、湿度（ $50 \pm 5\% \text{RH}$ ）的恒温车间，模拟真实生产场景的振动干扰源采用电磁振动台施加0.5–5Hz低频扰动。

在检测精度验证环节，采用配对实验设计方法：将同一零件在机器视觉系统与三坐标测量仪上交替测量30次，通过统计学方法计算两类设备的测量值均值差、标准差及置信区间。针对形状公差检测能力，特别设计包含人工加工缺陷的测试样本——在标准圆环件上制造0.02–0.05mm的局部凹陷，在平面件上加工0.03mm/m的微曲率表面，用于验证系统对微小形变特征的捕捉能力。重复性测试除常规30次连续测量外，额外设置间隔8小时的间断性测量序列，以考察系统标定参数的时效稳定性。环境鲁棒性测试则通过主动调节照明强度（ $\pm 20\%$ ）、引入模拟油雾污染等方式，量化检测结果对干扰因素的敏感度。

实验数据显示，系统在轴类零件检测中表现出优异的一致性，直径测量值的极差为0.028mm，标准差 $\sigma = 0.0047 \text{mm}$ ，较三坐标测量数据偏差绝对值最大值为

0.013mm，出现在直径42mm试件的第23次测量中，经溯源发现由该次采集成像时环境光波动导致。孔类零件的内径检测稳定性相对略低，30次测量数据分布呈现轻微负偏态，分析认为这与内壁表面粗糙度引起的边缘提取波动有关，当孔径小于10mm时，最大偏差达到0.019mm，但在孔径大于15mm的样本中偏差稳定在0.01mm以内。平面类零件厚度检测的重复性最佳，所有样本测量极差均未超过0.008mm，尤其在5mm标准量块检测中，系统测量均值与标称值偏差仅为 $-0.0012 \text{mm}$ ，验证了光学成像系统的轴向分辨率优势。

在形状公差检测能力验证中，系统成功识别出所有预设缺陷样本。对于带有0.03mm圆度偏差的测试件，系统通过360°轮廓点云分析，检测结果为0.031mm，与三坐标测量结果偏差仅0.002mm。直线度检测中，系统采用分段拟合法将1m长的导轨样本划分为20个检测区间，有效识别出第三、第八区间的0.018mm/m局部弯曲，该结果与激光干涉仪的检测数据高度吻合。值得注意的是，在表面粗糙度 $Ra = 1.6 \mu\text{m}$ 的试件检测中，系统仍能保持稳定的边缘定位能力，但当粗糙度升至 $Ra = 3.2 \mu\text{m}$ 时，圆度检测误差增大约40%，表明表面纹理特征对光学检测存在显著干扰。

深入分析误差来源发现，约68%的尺寸检测偏差集中在边缘定位环节。通过灰度梯度法提取的边缘点，在照明不均匀区域会出现0.5–2像素的定位漂移，相当于物理尺寸的0.003–0.012mm误差。对此，实验验证了两种改进方案：采用双侧光源对称照明可使误差降低22%，而基于亚像素插值的边缘细化算法可进一步减少15%的定位偏差。在形状公差计算层面，传统最小二乘法对异常点敏感，当轮廓点云包含3%以上的噪点时，圆度计算结果波动幅度达25%。改用RANSAC（随机抽样一致性）算法后，在同等噪声条件下计算结果稳定性提升至91%，但计算耗时增加约300ms，这揭示了算法精度与实时性之间的权衡关系。

系统的环境适应性测试暴露出若干关键问题。在主动施加光照强度波动（ $\pm 20\%$ ）的实验中，直径检测结果的变异系数从0.8%上升至2.1%，通过在图像预处理环节引入自适应直方图均衡化算法，可将波动影响抑制在1.3%以内。面对车间常见的油雾污染，当镜头污染面积达到5%时，检测误差呈现非线性增长趋势，特别是孔类零件的内径测量值会系统性偏大约0.005–0.008mm，这提示需要建立基于图像质量评价的自动报警机制。值得肯定的是，系统在8小时连续运行测试中表现出良好的稳

定性，检测耗时标准差保持在  $\pm 0.4$  秒内，内存占用量波动范围不超过 15MB，满足工业现场长时间作业需求。

通过系列实验，不仅验证了系统在常规工况下的检测能力，更揭示了若干改进方向：首先，开发基于多光谱成像的表面状态分析模块，可有效区分油污、划痕等干扰因素与真实尺寸特征；其次，建立温度-像素当量补偿模型，能够缓解环境温度变化引起的系统标定参数漂移；最后，引入基于深度学习的异常点过滤算法，有望在保持实时性的前提下进一步提升形状公差检测精度。这些发现为机器视觉检测技术的工程化改进提供了扎实的实验依据，也为不同应用场景下的系统参数优化建立了量化调整基准。

#### 四、应用分析与改进方向

本研究开发的机器视觉检测系统已在三家中小型机械加工企业完成试点应用。在生产现场部署时，系统通过集成至传送带末端，实现了零件加工后的在线自动检测，替代了原有的人工抽检流程。某企业案例显示，系统上线后检测环节人力成本降低 72%，漏检率由 1.8% 下降至 0.3%，同时检测数据实时上传至 MES 系统，为工艺参数优化提供了数据支撑。这种非接触式检测方案特别适用于精密轴套、连接件等中小型零件的批量检测场景，其与工业机器人、AGV 等设备的协同作业能力，展现出在柔性制造系统中的重要应用价值。

然而，系统在实际应用中仍存在技术局限。对于具有螺纹、曲面等复杂特征的零件，现有算法难以稳定提取三维形貌数据，需结合结构光扫描技术进行功能扩展。环境光照波动对检测稳定性影响显著，虽采用封闭式检测舱与主动光源补偿机制，但在车间多尘环境下仍需每日清洁光学组件。此外，系统标定参数的时效性约为一周，频繁更换检测对象时会增加维护工作量，未来可通过开发自动标定程序与温度补偿模块提升适应性。

技术改进应着重解决三个核心问题：在检测能力层面，需引入基于深度学习的特征分割模型，提升对划痕、毛刺等微观缺陷的识别精度；在环境适应性方面，开发多光谱成像与动态曝光控制技术，增强系统在复杂工况下的鲁棒性；针对运维效率痛点，研究基于数字孪生的虚拟标定方法，通过仿真预训练减少现场调试时间。这些改进方向将推动系统从单一尺寸检测向综合质量评估升级，满足智能制造对检测技术的多维需求。

#### 五、结论与展望

本研究成功构建了基于机器视觉的零件自动化检测系统，通过硬件选型优化与算法创新，实现了对轴、孔、平面类零件基础几何参数的高效测量。实验验证表明，系统在尺寸检测精度、形状公差分析能力方面达到工业应用标准，单件检测效率较传统方法提升 5 倍以上。所提出的模块化设计架构与标准化检测流程，为制造企业提供了可直接复用的技术实施方案，具有显著的经济效益与推广价值。

未来研究可从三个维度深入拓展：在缺陷检测领域，引入卷积神经网络构建分类模型，通过迁移学习解决样本数据不足问题，实现表面缺陷的智能识别与分类；针对复杂零件检测需求，探索机器视觉与激光位移传感器、红外热像仪的多源数据融合方法，建立多维质量评价体系；在系统自适应方面，开发基于粒子群算法的照明参数实时优化模型，根据零件材质与表面特性动态调整光源配置。这些技术的突破将推动机器视觉检测从单一工工具向智能感知终端进化，为智能制造质量控制提供更强大的技术支撑。

#### 参考文献

- [1] 蔺小军, 单晨伟, 王增强, 史耀耀. 航空发动机叶片型面三坐标测量机测量技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(1): 125-131.
- [2] 裴世峰, 谭阳伟. 机械加工过程中零件精度的研究[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(27): 161-163.
- [3] 王凤丽. 农业机械零件数控加工方法分析[J]. 农机使用与维修, 2023(6): 81-83.
- [4] 王道青. 浅析机械加工对金属零件的表面质量的影响[J]. 世界有色金属, 2022(18): 37-39.
- [5] 王道青. 机械加工对金属零件加工精度的影响[J]. 世界有色金属, 2022, 47(17): 19-21.
- [6] 王修亮, 杨涛. 机械加工工艺对零件制作精度的影响及控制措施[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(17): 120-123.
- [7] 陈林. 机械加工工艺对零件制造精度影响探究[J]. 模具制造, 2023, 23(6): 66-69.
- [8] 赵彦军, 毛文亮. 复杂零件增减材复合制造精度控制研究[J]. 机械研究与应用, 2022, 35(2): 21-23.