

基于机器视觉的加工精度在线检测系统设计与应用

胡艳娥¹ 诸进才¹ 郑卓鋈¹ 汤爱军¹ 魏文锋²

1.广州铁路职业技术学院智能制造学院 广东广州 511300;

2.广州数控设备有限公司智能制造工程中心 广东广州 510165

【摘要】加工精度实时检测是智能制造领域核心技术，基于机器视觉原理构建在线检测系统，实现加工零件精度高效非接触式监测。系统整合图像采集、特征识别、误差分析等关键功能模块，复杂工业环境条件下可稳定运行。实际应用场景验证显示，检测效率与精度获明显提升，系统兼具通用适配特性与扩展应用能力，为智能化质量控制环节提供技术支持。

【关键词】机器视觉；在线检测；加工精度；图像处理；误差分析

Design and Application of an Online Machining Accuracy Detection System Based on Machine Vision

Hu Yan'e¹ Zhu Jincai¹ Zheng Zhuojun¹ Tang Aijun¹ Wei Wenfeng²

1. Intelligent Manufacturing College of Guangzhou Railway Vocational and Technical College, Guangdong Guangzhou 511300;

2. Intelligent Manufacturing Engineering Center of Guangzhou CNC Equipment Co., Ltd. Guangdong Guangzhou 510165

【Abstract】 Real time detection of machining accuracy is a core technology in the field of intelligent manufacturing. Based on machine vision principles, an online detection system is constructed to achieve efficient non-contact monitoring of machining part accuracy. The system integrates key functional modules such as image acquisition, feature recognition, and error analysis, and can operate stably under complex industrial environmental conditions. The practical application scenario verification shows that the detection efficiency and accuracy have been significantly improved, and the system has both universal adaptation characteristics and extended application capabilities, providing technical support for intelligent quality control.

【Key words】 machine vision; Online detection; Processing accuracy; Image processing; error analysis

引言：

制造业持续迈向自动化与智能化转型，传统加工精度检测手段已难满足现代生产效率与质量控制的双重核心要求。机器视觉具备非接触测量、高速度响应及智能化处理核心特性，在精度检测领域展现出广阔应用前景。针对加工环节中零件几何尺寸与表面质量的实时检测实际需求，设计一套集图像智能识别与精度量化分析于一体的在线检测系统，助力提升制造全流程自动化水平与产品质量一致性。

一、加工精度在线检测的技术需求与挑战

加工精度是制造业质量控制核心指标，直接决定产品性

能优劣与实际使用寿命长短，当前高端制造领域，零部件普遍呈现复杂形貌特征，配合严苛的高精度加工标准，传统接触式测量方法已无法胜任在线检测任务。这类方法检测效率偏低，更难以匹配现代生产线高速、连续的运转节奏。机器视觉技术凭借高速动态成像、非接触式精准测量及实时数据处理能力，成为加工精度在线检测的重要技术方向。实现高精度与高稳定性的在线视觉检测系统，需在硬件选型匹配、图像采集参数、光源优化设计及环境适应性调试上重点把控，保障系统在强噪声干扰、复杂背景环境与多样工件状态下始终稳定运行。

加工过程中工件表面常出现微小划痕、毛刺或油污等干扰，给图像识别带来不小挑战，加工设备振动、热变形及工件装夹位置的细微偏差，也会引入系统误差。这些不确定性

要求视觉系统配备高鲁棒性算法,亚像素级边缘提取、图像去噪增强、自适应模板匹配等技术的应用,可实现尺寸误差、几何形位公差及边缘轮廓变化的精确判别^[1]。精度检测阶段,图像采集频率、分辨率参数、镜头畸变控制效果与标定精度水平,均对最终检测结果产生显著影响。传感器选型到处理算法优化的每一环节,都需开展系统化调整与协同设计,保障整体检测系统具备工业级稳定应用能力。

加工现场环境始终复杂多变,光照强度的随机波动、粉尘的持续干扰及温湿度的频繁起伏,都对视觉系统长期稳定性构成直接威胁。为适配这样的现实工况,检测系统需做好全方位环境适应性设计,搭建抗干扰能力强的光源系统,配置运行稳定的图像采集平台,搭载性能可靠的边缘计算单元。系统还需与数控加工设备建立高效数据交互机制,实现检测结果实时反馈至生产端,触发自动闭环控制流程,完成在线误差修正与加工参数自适应调节。这种软硬件深度集成的设计思路,既有效提升生产过程智能化水平,又推动机器视觉在高端装备制造领域的深度落地,成为智能工厂实现精密制造不可或缺的核心组成部分。

二、基于机器视觉的检测系统架构设计

机器视觉加工精度在线检测系统,架构设计关联系统稳定性、检测精度与应用效率,系统包含图像采集模块、光源控制模块、图像处理单元、误差分析模块、系统通信与控制平台。图像采集环节,依据工件几何特征与检测要求选定工业相机及镜头,面阵相机、线扫相机、高帧率相机为常用类型,像素精度、帧率、传感器动态范围决定检测空间分辨率与时间响应能力。光源设计需结合工件表面材质与反射特性,采用同轴光、环形光、多角度结构光照明,增强待检测特征成像对比度,保障边缘清晰、灰度稳定,抑制背景干扰与噪声。

图像处理单元搭载嵌入式处理器或工业级边缘计算平台,完成采集图像实时处理与分析,模块集成高斯滤波、中值滤波、直方图均衡化等图像预处理算法,提升图像质量、去除干扰。特征提取环节,结合工件检测内容选用轮廓识别、形状匹配、边缘定位、图像配准等算法,强化系统对微小尺寸变化的分辨能力^[2]。更高精度需求场景下,采用亚像素级定位与机器学习算法增强精度。误差分析模块实时计算、统

计分析测量结果,比对设计尺寸与实际检测值,输出偏差数据及可视化结果,参照容差标准判断是否超出允许范围,为上位系统提供报警触发或加工参数调整的决策依据。

系统通信与控制平台作为中枢,实现与生产设备的高速数据交互,经过 EtherCAT、Profinet、Modbus 等工业总线连接数控机床、PLC 及 MES 系统,完成数据上传下达与控制指令闭环响应。平台需具备强实时性、稳定性与可扩展性,适配多工位并行检测、多任务调度及复杂工艺路径变化等场景。软件架构采用模块化编程与分层控制策略,便于后期功能拓展与维护升级。架构既满足现有加工精度检测需求,也兼顾未来智能制造体系中 AI、云边协同、数据驱动优化等新兴技术的融合潜力,构建开放、可重构、高可靠性的视觉检测平台,全面提升制造环节的精度控制与质量管理水平。

三、核心算法与关键模块实现路径

基于机器视觉的加工精度在线检测系统,核心算法的科学选择与关键模块的稳定实现直接决定系统整体运行性能及检测精度水平。图像预处理算法专门承担图像增强与噪声抑制核心任务,中值滤波、双边滤波、边缘保持滤波等成熟技术为行业常用手段,可确保高噪声背景下原始图像依旧具备清晰可辨的特征轮廓形态。不同光照强度条件与多样材质反射特性场景中,系统需动态调整曝光参数与白平衡优化策略,持续保障图像灰度数值稳定性和目标特征对比度。灰度梯度类边缘检测算法里,Canny 与 Sobel 算子已被广泛应用于轮廓精准提取,面对高精度检测需求的实际场景时,亚像素边缘检测算法成为技术核心,涵盖基于高斯拟合与边缘插值的经典实现方法,成功实现微米级别的精准边界定位效果。

特征识别与定位模块,是完成尺寸测量及形位公差判别任务的核心环节,借助形状模板匹配、Hough 变换及图像配准等技术手段,能够精准提取孔径、边缘长度、圆弧半径等关键几何特征。动态加工过程里,工件常会出现姿态偏移与装夹偏差,系统需调用仿射变换或透视变换算法统一坐标系,保障检测结果具备全局一致性^[3]。为进一步提升识别精准度与系统环境适应性,各类检测系统正逐步引入深度学习算法,特别是基于卷积神经网络(CNN)的图像分类与目标检测模型——YOLO、Mask R-CNN 等模型表现突出,可对复杂背景中的工件特征实现鲁棒识别,在多类型工件检测或

表面缺陷识别任务中优势明显。传统图像处理方法与深度模型的融合应用,让系统在维持实时响应能力的基础上,达成了更高标准的检测准确率。

关键模块的实现路径,需充分考量系统实时响应与运行稳定两大核心需求,硬件架构层面,边缘计算平台搭配 GPU 加速单元的组合方案,能显著提升图像处理效率。工业相机、光源控制器与执行机构的高效协同,为系统筑牢数据采集与算法处理的低延迟运行基础。软件实现采用模块化架构设计,图像采集、处理、分析及输出等功能单元各自独立,极大便利系统后续更新与维护工作,多线程并发机制与缓存策略的应用,让实时数据处理流程实现数据高速传输与任务灵活调度。系统配备图形化交互界面,同步接入数据库支持,操作人员可轻松完成检测数据的可视化分析与溯源追踪。结合算法性能、资源消耗及工业现场应用环境等因素,设计中着重推进软硬件协同优化,最终达成检测精度、处理速度与系统稳定性的高效平衡。

四、系统应用效果分析与优化策略

机器视觉加工精度在线检测系统的工业应用实践,凸显其在提升检测效率、强化产品一致性、降低人工成本上的显著优势。复杂生产线中,系统可实时检测多类型零件的尺寸参数、轮廓特征及表面缺陷,成功替代传统人工检验与离线测量模式。高分辨率工业相机搭配高亮度稳定光源,精准捕捉微小误差,高速运行状态下仍保持高检测精度。系统部署后,生产节拍不受影响,质量控制反馈周期大幅缩短,部分场景检测误判率从人工检验的 3.5% 降至 0.6%,直观印证了机器视觉系统在稳定性与准确性上的技术成熟度。

系统实际运行中,部分工况凸显出明显瓶颈:强干扰背景下图像分割易出误差,不同批次工件因材质反光导致图像

灰度不均,多工位场景下同步精度不足。提升系统鲁棒性与适应性,需优先优化图像预处理模块,引入自适应光照补偿算法与多通道图像融合技术,强化图像清晰度与特征对比度^[4]。高复杂度轮廓识别难题,可经过形态学分析与深度学习目标检测网络联合建模破解,注意力机制的加入能增强模型对局部边界特征的感知。系统标定与空间坐标转换环节,需着力降低环境漂移对检测精度的干扰,动态标定机制的应用可提升系统长期运行的稳定性。

全面提升系统性能,需在整体架构与运行机制上持续深耕细作,搭建精准闭环控制策略,将实时检测结果快速反馈至数控加工设备,在线微调关键工艺参数,真正构建起质量控制与制造过程的动态联动体系。软件端重点开发具备自主学习能力的检测模型,系统依托海量历史检测数据迭代优化识别策略,显著增强对新工件及特殊工艺变化的自适应能力。云端数据平台集中存储检测结果并开展深度趋势分析,为精细化质量管理提供坚实大数据支撑。硬件方面科学优化光源布局与传感器安装方式,强化系统抗震性能与复杂环境适应性,使其稳定适配多粉尘、高振动等复杂加工场景。多维度技术改进与策略优化并行推进,推动机器视觉加工精度在线检测系统不断拓展智能制造应用边界,切实助力企业迈向高质量、高效率的现代化生产模式。

结语:

本文围绕机器视觉加工精度在线检测系统,系统阐述技术需求、架构组成、核心算法及工业应用实效。软硬件协同设计与算法迭代优化,让系统在实际生产场景中呈现出优异稳定性与检测精度。智能制造持续深化的未来,机器视觉检测技术将深度融合人工智能、边缘计算与工业物联网,推动制造质量监控迈向更高效、更智能的发展阶段。

参考文献

- [1]周晶.基于特征级网络的玻璃盖板缺陷检测设备设计[J].机械研究与应用, 2025, 38(05): 56-59+64.
- [2]张雷, 陆东, 刘申, 等.基于机器视觉的多规格螺丝锁付系统[J].工业仪表与自动化装置, 2025, (05): 12-17+123.
- [3]张岩松, 吴义强, 陶涛, 等.机器视觉在家具制造中的应用与展望[J].中国人造板, 2025, 32(10): 30-36.
- [4]郎宁, 王飞, 邓栋, 等.智能激光清洗技术研究进展及应用展望[J].金属加工(热加工), 2025, (10): 1-11+19.

*项目资助: 广东省普通高校工程技术开发中心(项目编号: 2019GGCZX008)。