

基于机器视觉的非标自动化装配系统设计研究

高鹏飞¹ 崔卫星²

1 北京轩宇智能科技有限公司

2 北京配天技术有限公司

DOI:10.32629/acair.v4i2.20399

[摘要] 本文聚焦基于机器视觉的非标自动化装配系统设计研究,针对传统装配方式难以满足多样化生产需求的问题,开展系统化探索。通过分析系统功能需求,设计分层架构并明确关键技术指标,重点优化机器视觉模块的硬件选型、图像处理算法及标定补偿方法,提升视觉定位精度;同步开展机械结构拓扑优化与末端执行器定制化设计,构建视觉-机械协同控制策略以实现动态装配误差补偿。实验平台测试表明,系统可显著提高非标零部件的装配效率与精度,为复杂制造场景下的柔性自动化生产提供技术支撑。

[关键词] 机器视觉; 非标自动化; 机械机构设计; 集成系统; 装配精度

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Research on the Design of Non standard Automated Assembly System Based on Machine Vision

Pengfei Gao¹ Weixing Cui²

1 Beijing Xuanyu Intelligent Technology Co., Ltd

2 Beijing Peitian Technology Co., Ltd

[Abstract] This article focuses on the design research of non-standard automated assembly system based on machine vision, and explores systematically the problem that traditional assembly methods are difficult to meet diversified production needs. By analyzing the system's functional requirements, designing a layered architecture, and clarifying key technical indicators, we will focus on optimizing the hardware selection, image processing algorithms, and calibration compensation methods of the machine vision module to improve visual positioning accuracy; Simultaneously carry out mechanical structure topology optimization and customized design of end effectors, and construct a visual mechanical collaborative control strategy to achieve dynamic assembly error compensation. The experimental platform testing shows that the system can significantly improve the assembly efficiency and accuracy of non-standard components, providing technical support for flexible automation production in complex manufacturing scenarios.

[Key words] machine vision; Non-standard automation; Mechanical mechanism design; Integrated system; assembly accuracy

1 引言

在制造业向智能化、柔性化转型的背景下,非标自动化装配需求日益增长。传统装配系统依赖固定工装与人工示教,存在设备复用率低、适应性差等问题,难以满足多品种、小批量产品的快速换型需求。机器视觉技术凭借非接触测量、实时反馈与动态调整能力,成为突破非标装配精度与效率瓶颈的关键技术。本文针对异形零部件装配场景,提出融合高精度机器视觉定位与自适应机械控制的集成方案:通过视觉模块实现工件位姿的实时识别与误差补偿,结合拓扑优化后的轻量化机械结构与智能

协同控制策略,解决传统系统刚性耦合导致的柔性不足问题。研究涵盖视觉算法开发、机械系统设计及多模态协同控制等维度,旨在构建可重构、易扩展的非标装配平台,为复杂制造场景下的智能化升级提供理论支撑与技术实现路径。

2 基于机器视觉的非标装配系统总体设计

在明确研究目标与技术路径后,需系统化构建非标自动化装配系统的设计框架。此部分围绕系统需求、架构设计及技术指标展开,形成从功能定义到技术落地的完整设计闭环。

2.1 系统需求分析与功能定义

针对异形零部件装配场景,系统需满足三大核心需求:一是兼容多品种工件的快速换型,通过视觉引导实现无固定工装定位;二是保障装配精度达到 $\pm 0.05\text{mm}$ 级,覆盖微米级特征匹配;三是支持动态误差补偿,适应机械传动链的累积偏差。功能层面定义四项关键能力:基于深度学习的工件位姿实时识别、多传感器融合的装配过程监控、视觉-机械协同的闭环控制,以及面向产线集成的人机交互界面。通过模块化功能拆解,确保系统对复杂装配任务的适应性。

2.2 系统架构设计

采用分层递进式架构设计,自下而上分为机械执行层、视觉感知层与决策控制层。机械执行层包含六自由度机器人本体、快换式末端执行器及精密传动模组,负责装配动作的物理实现;视觉感知层集成高分辨率工业相机、远心镜头及环形光源,构建三维测量系统,实现工件特征的高精度提取;决策控制层搭载工控机与运动控制器,运行视觉定位算法与协同控制策略,完成装配路径规划与实时修正。各层间通过EtherCAT总线实现毫秒级数据交互,形成“感知-决策-执行”的闭环控制流。

2.3 关键技术指标

系统技术指标聚焦三大维度:视觉模块需实现 0.01mm 的重复定位精度与 50fps 的实时处理速度;机械模块要求末端执行器重复定位精度 $\leq 0.02\text{mm}$,最大负载能力达 5kg ;集成系统层面需达到99.5%的装配成功率与 $\leq 3\text{s}$ 的单件装配周期。同时定义环境适应性指标,包括 $0\sim 45^\circ\text{C}$ 工作温度范围、IP65防护等级及抗电磁干扰能力,确保系统在工业现场的稳定运行。上述指标通过硬件冗余设计与算法优化协同实现。

3 机器视觉模块设计与优化

视觉模块作为非标装配系统的核心感知单元,其性能直接决定系统定位精度与动态响应能力。本部分从硬件架构、算法开发及标定补偿三个维度展开,构建高鲁棒性视觉系统,为机械执行层提供亚像素级位姿反馈。

3.1 视觉硬件选型与参数配置

硬件选型需权衡分辨率、帧率与景深等关键参数。针对微米级装配特征,选用500万像素CMOS工业相机,配合 0.3 倍远心镜头,构建无透视畸变的平行光路系统,确保测量平面内像素当量恒定为 $3.2\mu\text{m}/\text{pixel}$ 。光源系统采用环形LED阵列,通过16级亮度可调与 45° 入射角设计,强化金属工件表面纹理对比度。为适应产线节拍要求,相机帧率配置为 50fps ,配合千兆以太网接口实现无丢帧数据传输。机械接口方面,采用定制化转接板实现相机与机器人第六轴的刚性连接,基线距离设定为 200mm 以平衡测量范围与精度。硬件冗余设计包含双相机热备份机制,当主相机数据异常时,备用相机可在 100ms 内完成信号切换,保障系统连续运行能力。

3.2 图像处理算法开发

算法流程涵盖预处理、特征提取与位姿解算三阶段。预处理环节采用中值滤波抑制高频噪声,结合自适应阈值分割实现工件区域初步定位。针对复杂背景干扰,开发基于形态学操作的

区域生长算法,通过设定灰度梯度阈值完成工件轮廓精确提取。特征匹配阶段,对于规则工件采用模板匹配算法,构建包含50个特征点的匹配库,匹配相似度阈值设定为 0.85 ;对于异形工件,则运用基于SIFT的尺度不变特征变换算法,提取200个关键点并生成128维描述向量。位姿解算模块集成正交迭代算法,通过迭代优化重投影误差,将六自由度位姿解算精度提升至 $0.01\text{mm}/0.005^\circ$ 。算法优化包含并行计算加速,利用GPU的CUDA架构实现特征提取环节的10倍速率提升,满足实时性要求。

3.3 视觉标定与误差补偿

标定过程分两阶段实施:首先采用张正友平面标定法完成相机内参标定,通过拍摄20组不同角度的棋盘格图像,解算焦距、主点坐标及畸变系数,重投影误差控制在 0.05 像素以内;其次进行手眼标定,构建“眼在手”系统的 $AX=XB$ 方程,通过采集50组机器人末端位姿与对应图像特征点数据,采用Tsai两步法求解旋转矩阵与平移向量,标定精度达 0.1mm 。误差补偿机制包含静态补偿与动态修正:静态补偿通过建立温度-畸变模型,对镜头热漂移进行预校正;动态修正则基于卡尔曼滤波算法,对机械传动链的周期性振动进行实时估计,滤波周期设定为 10ms 。实验表明,经标定补偿后系统综合定位误差从 0.2mm 降至 0.03mm ,满足 $\pm 0.05\text{mm}$ 的装配精度要求。

4 机械机构设计与集成

机械机构作为非标装配系统的执行载体,其设计需兼顾精度、刚性与动态响应特性。本部分从结构优化、末端工具创新及多模态协同控制三个层面展开,构建与视觉模块深度耦合的高性能机械系统,实现微米级装配精度与毫秒级动态修正能力。

4.1 机械结构拓扑优化

针对传统串联机构刚度不足的问题,采用变密度法开展拓扑优化设计。以机器人大臂为例,构建包含30万单元的有限元模型,设定材料体积分数约束为 0.4 ,通过SIMP插值模型实现材料密度与弹性模量的非线性映射。优化目标函数定义为结构柔度最小化与一阶固有频率最大化,经过200次迭代收敛后,关键部位材料分布呈现仿生骨架构型,质量减轻18%的同时刚度提升25%。为验证优化效果,加工样件进行模态测试,实测一阶固有频率达 120Hz ,较原始结构提高22%,有效抑制装配过程中的振动耦合。轻量化设计方面,采用碳纤维增强复合材料替代铝合金制造小臂,通过真空灌注工艺控制纤维铺层角度,实现比强度提升40%与热膨胀系数降低至 $6\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,显著减少温度变化引起的定位偏差。

4.2 末端执行器设计

末端执行器采用模块化快换结构,集成力觉传感器与微型气缸,实现抓取-装配一体化操作。针对异形工件,设计三指柔性夹爪,指端包覆硅胶材料并嵌入压力传感器,通过PID控制算法维持接触力恒定在 $2\text{N}\pm 0.1\text{N}$ 范围内。对于精密轴类零件,开发真空吸盘式执行器,采用FEP薄膜作为吸附界面,配合真空发生器产生 -80kPa 负压,确保吸附力稳定且无磁性干扰。为适应多品种装配需求,执行器与机器人末端采用ISO9409-1-50-4-M6标准接

口,配合电气快换盘实现30秒内工具更换。气动系统集成比例阀与压力开关,通过CAN总线实现吸盘压力的闭环控制,响应时间缩短至50ms。实验测试表明,执行器重复定位精度达0.02mm,最大负载能力5kg,满足系统技术指标要求。

4.3 视觉-机械协同控制策略

构建基于位置-力混合控制的协同架构,实现视觉定位与机械执行的动态耦合。视觉引导层通过EtherCAT总线实时传输工件位姿数据,控制周期设定为4ms,较传统示教模式响应速度提升10倍。在插入装配阶段,采用阻抗控制算法构建虚拟弹簧-阻尼模型,通过调整刚度系数与阻尼系数实现柔顺装配,当接触力超过3N时自动触发退避动作。为解决视觉延迟问题,开发预测控制模块,基于卡尔曼滤波算法对工件运动趋势进行预估,修正周期缩短至2ms。同步控制方面,采用双编码器反馈机制,通过比较电机端与负载端编码器数据,实时补偿传动链间隙与弹性变形。实验数据显示,协同控制策略使装配成功率从92%提升至99.5%,单件装配周期压缩至2.8秒,较传统方案效率提高40%。

5 系统实验与结果分析

系统设计的有效性需通过实验验证与量化分析。本部分构建完整的实验验证体系,从平台搭建、指标测试到误差溯源,形成“设计-验证-优化”的闭环研究路径,为非标装配系统的工程化应用提供数据支撑。

5.1 实验平台搭建

实验平台集成六自由度工业机器人、高精度视觉系统及定制化装配工装。视觉模块通过千兆以太网与工控机通信,机械控制层采用EtherCAT总线实现1ms级同步控制。为模拟真实产线环境,实验台配置温湿度控制系统及振动隔离平台。测试工件选用航空连接器组件,包含0.5mm级精密插针与异形壳体,装配精度要求 $\pm 0.05\text{mm}$ 。数据采集系统集成激光跟踪仪与力传感器,实现装配过程的全维度监测。实验平台采用模块化设计,各子系统通过标准接口连接,便于快速重构以适应不同测试场景。

5.2 性能测试指标

性能验证围绕精度、效率与稳定性三大维度展开。精度测试包含静态定位精度与动态装配精度:静态测试通过激光跟踪仪测量机器人末端实际位姿与指令位姿的偏差,采集1000组数据后计算均值误差与标准差;动态测试记录500次装配过程中插针与壳体的实际配合间隙,统计合格率与最大超差值。效率指标重点考察单件装配周期与设备利用率,通过PLC日志分析计算理论节拍与实际节拍的比值。稳定性测试采用加速寿命试验方法,连续运行72小时后检测关键部件如减速机、同步带的性能衰减率,同时监测视觉系统的误检率变化。实验数据显示:静态定位精度达0.03mm,动态装配合格率99.2%,单件周期2.7秒,设备利

用率92.5%,72小时后性能衰减率低于3%,各项指标均满足设计要求。

5.3 误差来源分析与改进

误差溯源发现主要误差源包含机械传动误差、视觉识别误差与环境干扰。机械误差方面,谐波减速机的周期性振动导致末端轨迹波动,通过在传动链中增加阻尼环使振动幅值降低62%;视觉误差源于工件表面反光不均,优化光源角度并改用偏振滤镜后,特征提取成功率提升至99.7%。环境干扰中,温度变化引起的材料膨胀导致 $0.015\text{mm}/^{\circ}\text{C}$ 的定位偏移,采用温度补偿算法后误差消除率达85%。针对剩余误差,开发混合补偿模型:机械误差通过建立传动链误差映射表进行前馈补偿,视觉误差采用卡尔曼滤波进行实时修正,环境误差则通过神经网络拟合温度-湿度-误差的非线性关系。改进后系统综合误差从0.12mm降至0.04mm,装配成功率由99.2%提升至99.8%,验证了误差补偿策略的有效性。

6 结语

本文针对非标装配系统的高精度、高柔性需求,从机械机构优化、多模态感知融合及协同控制策略三个层面开展系统性研究,构建了视觉-机械深度耦合的智能装配平台。通过变密度拓扑优化与碳纤维轻量化设计,机械本体刚度提升25%的同时质量减轻18%,为高速动态响应奠定基础;末端执行器采用模块化快换结构与力-位混合控制,实现异形工件的无损抓取与精密轴类零件的真空吸附,负载能力达5kg且重复定位精度0.02mm;视觉-机械协同控制架构整合预测控制与阻抗调节机制,将装配周期压缩至2.7秒,动态装配合格率提升至99.8%。实验验证表明,系统在温度波动 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、振动干扰 $\leq 10\text{Hz}$ 的复杂工况下,仍能维持 $\pm 0.04\text{mm}$ 的综合定位精度,较传统方案精度提升3倍、效率提高40%。研究成果为精密制造领域的非标自动化设备开发提供了理论支撑与技术范式,后续将聚焦多机器人协同装配与数字孪生运维技术,进一步拓展系统在航空、半导体等高端制造场景的应用深度。

[参考文献]

- [1]鲁观娜.基于机器视觉的计量检定流水线非标异物入侵自动化识别方法[J].计算技术与自动化,2025,44(2):142-146.
- [2]王珊珊.做机器人的“眼和大脑”:一家机器视觉企业的“智造”升维[N].中国工业报,2026-02-09(003).
- [3]周逸苏.基于机器视觉的非标塑料件分拣系统[D].南京大学,2020.

作者简介:

高鹏飞(1986--),男,汉族,山东青岛人,本科,中级工程师,研究方向:非标自动化机械设计。