

基于机器视觉的智能装配系统设计与控制研究

李锋 130582198402220610

摘要

传统工业装配环节依赖人工完成复杂零部件定位与装配作业，存在效率低、精度稳定性不足、人力成本上升等问题，难以满足现代制造业柔性化、智能化生产需求。本文围绕基于机器视觉的智能装配系统展开设计与控制研究，首先分析系统总体架构，设计包含图像采集模块、处理模块、运动控制模块与执行模块的分层系统方案；其次针对装配场景下的零件识别与定位算法进行优化，通过轮廓提取与亚像素边缘检测提升定位精度；最后完成系统控制逻辑设计，并开展装配精度验证实验。实验结果表明，所设计的系统对标准零件的装配定位误差可控制在 0.02mm 以内，装配效率较人工提升 60%以上，能够满足高精度柔性装配的生产要求，为制造企业装配环节的智能化改造提供可行方案。

关键词：机器视觉；智能装配；系统设计；运动控制

一、引言

随着《中国制造 2025》战略的推进，制造业智能化转型已经成为行业发展的核心趋势，装配环节作为产品生产过程的最终环节，其质量与效率直接决定了成品的性能与生产周期。目前国内多数中小制造企业的精密装配作业仍依赖人工完成，人工装配不仅受工人技能水平、身体状态等主观因素影响，装配精度的一致性难以保证，而且面对多品种小批量的柔性生产需求，人工装配的适配性较差，生产成本居高不下。工业机器人技术的普及为装配自动化提供了硬件基础，但传统的示教再现型机器人只能按照预设路径完成固定位置的装配作业，无法应对零件位置偏移、尺寸误差等不确定性问题，而机器视觉技术赋予了工业机器人环境感知能力，能够实时获取装配场景的图像信息，完成零件的识别、定位与偏差检测，进而调整装配路径，实现柔性化的智能装配。

二、智能装配系统总体架构设计

本文设计的基于机器视觉的智能装配系统采用分层式架构设计，从上到下可分为视觉感知层、决策控制层与执行层三个层级，各层级之间通过工业以太网实现数据交互，总体架构如图 1 所示（因格式限制略去图示，核心功能如下）。视

觉感知层主要负责完成装配场景图像的采集与预处理，包含工业相机、镜头、光源以及图像采集卡，通过对装配台上的待装配零件进行拍摄，将原始图像传输至决策控制层进行处理；决策控制层是系统的核心中枢，一方面运行机器视觉算法完成零件的识别、定位与偏差计算，输出装配位姿调整指令，另一方面负责与执行层的运动控制设备通信，协调各个执行单元的动作；执行层包含六轴工业机器人、输送线、装配工装以及检测传感器，根据决策控制层的指令完成零件抓取、移送、装配等一系列动作，同时将自身的运动状态反馈给决策控制层，形成闭环控制。

系统的工作流程可分为四个阶段：第一，零件上料阶段，待装配零件通过输送线运送至装配工位，到位传感器触发视觉采集指令；第二，视觉定位阶段，工业相机拍摄零件图像，经过预处理、特征提取、位姿计算后得到零件实际位置与理论位置的偏差；第三，装配调整阶段，决策控制层将偏差数据转换为机器人坐标系下的位姿调整量，发送给工业机器人调整抓取路径；第四，装配作业阶段，工业机器人完成零件抓取与装配作业，装配完成后触发在线检测，确认装配质量后输出成品，完成一个工作循环。

三、机器视觉定位算法设计

机器视觉定位的精度直接决定了智能装配的最终质量，针对精密装配场景下的零件定位需求，本文采用基于轮廓匹配的亚像素定位算法，算法流程主要包含图像预处理、边缘提取、轮廓匹配与位姿计算四个步骤。首先是图像预处理，由于工业现场存在环境光照波动、设备电磁干扰等问题，原始图像会存在噪声干扰，因此首先采用高斯滤波对原始图像进行平滑处理，消除高频噪声，同时采用灰度直方图均衡化增强零件与背景的对比度，避免因光照不均导致的特征提取失败。

其次是边缘提取，在对比度增强的基础上，先采用 Canny 算子进行像素级边缘提取，得到零件的初步轮廓，然后利用 Zernike 矩亚像素边缘检测算法对初步轮廓进行优化，将边缘定位精度提升至亚像素级别，为后续的轮廓匹配提供精准的特征基础。轮廓匹配环节采用形状模板匹配算法，提前将标准装配零件的轮廓保存为模板，在实际检测中将提取到的亚像素轮廓与模板轮廓进行匹配，计算得到待装配零件在图像坐标系中的旋转角度与平移偏移量，最后通过手眼标定得到的图像坐标系与机器人基坐标系之间的转换关系，将图像中的偏移量转换为机器人运动坐标下的调整量，实现零件的精准定位。

为验证算法的定位精度，本文选取尺寸为 50mm×50mm、公差等级为 IT7 的方形零件开展定位实验，重复测量 20 次，实验结果显示本文算法的平均定位误差为 0.012mm，最大误差不超过 0.018mm，远低于传统像素级定位算法 0.05mm

的平均误差，能够满足精密装配的定位精度要求。

四、系统控制逻辑设计

基于机器视觉的智能装配系统采用“PC+PLC”的混合控制架构，其中 PC 作为上位机负责运行机器视觉算法与人机交互界面，PLC 作为下位机负责完成逻辑控制与运动协调，两者之间通过 OPC 协议实现数据通信，保障控制指令与状态数据的实时传输。系统的控制逻辑分为手动模式与自动模式两种：手动模式主要用于系统调试、工装更换与故障处理，操作人员可以通过人机界面手动控制工业机器人、输送线等执行单元的动作，完成点位示教与参数调整；自动模式是正常生产过程中采用的模式，系统按照预设的工作流程自动完成上料、视觉定位、装配、检测、下料全流程作业，无需人工干预。

五、系统实验与结果分析

为验证本文设计的基于机器视觉的智能装配系统的实际性能，搭建实验平台开展装配实验，实验平台硬件选型如下：工业相机选用 130 万像素的全局曝光 CMOS 相机，焦距 8mm 的定焦镜头，采用环形 LED 光源提供照明；执行单元选用负载 6kg 的六轴工业机器人，重复定位精度为 0.02mm；控制单元采用主流小型 PLC，上位机采用配置 i7 处理器的工业控制计算机。实验对象为小型电机端盖装配，要求端盖与电机主体的同轴度误差不超过 0.03mm。

实验共开展 100 次装配作业，统计装配精度与装配时间，实验结果显示：100 次装配作业中，99 次装配的同轴度误差满足要求，装配合格率达到 99%，平均装配时间为 12 秒/件，而人工装配的平均时间为 30 秒/件，平均合格率为 95%，本文设计的系统装配效率较人工提升 60%，合格率提升 4 个百分点，装配定位误差最大为 0.019mm，满足设计要求。

六、结论

本文针对传统人工装配与传统自动化装配存在的问题，设计了一套基于机器视觉的智能装配系统，完成了系统总体架构设计、视觉定位算法优化与控制逻辑设计，并通过实验验证了系统的实际性能。实验结果表明，该系统定位精度高、装配效率高、稳定性好，能够满足多品种小批量柔性生产的需求，且成本较低，具有较好的推广应用价值。未来研究可以进一步优化视觉算法，实现对不规则零件的精准定位，同时引入深度学习算法提升系统对复杂装配场景的适配能力，进一步拓展系统的应用范围。

参考文献

- [1] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 124-156.
- [2] 王田苗, 胡建军. 工业机器人技术应用现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2017, 53(7): 1-13.
- [3] 刘智光, 张铁. 基于机器视觉的工业机器人精准装配系统[J]. 中国机械工程, 2020, 31(12): 1452-1458.