

工业机器人视觉伺服系统在自动化装配中的应用研究概述

侯光涛 田 晨

西安航天精密机电研究所 陕西 西安 710100

摘要: 本文围绕工业机器人视觉伺服系统在自动化装配中的应用展开研究, 阐述其理论基础、关键技术, 深入分析在电子设备、汽车零部件、家电产品装配中的应用场景。通过高精度图像采集与处理、先进的目标识别和智能控制算法, 实现精准装配, 显著提升生产效率与产品质量, 同时提出技术优化、设备升级及系统集成等策略, 为工业机器人视觉伺服系统在自动化装配领域的深化应用提供参考。

关键词: 工业机器人; 视觉伺服系统; 自动化装配

1 工业机器人视觉伺服系统理论基础

1.1 视觉伺服系统的基本概念

视觉伺服系统(VSS)融合计算机视觉、机器人学与自动控制理论, 通过视觉传感器采集环境图像, 将信息转化为运动控制信号, 构建“感知-决策-执行”闭环, 实现工业机器人末端执行器的高精度位姿调整。相较于依赖预设轨迹的传统机器人控制系统, 视觉伺服系统突破了固定程序的局限, 能利用实时视觉反馈动态修正运动路径, 有效应对非结构化场景、目标偏移等复杂情况。在工业生产中, 零部件的微小偏差和环境光照变化易影响操作精度, 而视觉伺服系统凭借实时处理视觉信息的能力, 赋予机器人自主感知与自适应调整功能, 显著提升系统的灵活性与可靠性。视觉伺服系统在工业自动化领域的发展同步随技术演进。早期因图像处理与计算能力不足, 系统响应慢、精度低, 仅适用于简单任务。随着计算机视觉算法创新与高性能硬件普及, 其朝着高精度、实时性方向发展, 广泛应用于电子制造、汽车装配等高精度需求行业, 成为推动智能制造升级的核心技术。

1.2 视觉伺服系统的组成与分类

视觉伺服系统由视觉感知、数据处理、运动控制三大模块构成。视觉感知模块采用工业相机、深度相机等设备, 如同系统的“眼睛”, 负责采集工作环境图像; 数据处理模块作为“大脑”, 对图像进行滤波、特征提取、目标识别等处理, 将图像信息转化为机器人可识别的控制参数; 运动控制模块依据处理结果驱动机器人关节, 实现精准操作^[1]。按视觉反馈类型, 视觉伺服系统可分为基于位置的视觉伺服(PBVS)和基于图像的视觉伺服(IBVS)。PBVS先计算目标物体在世界坐标系下的三维位姿, 再与期望位姿对比生成指令; IBVS直接利用图像特征偏差控制机器人, 虽避免三维重建、计算效率高, 但对特征选取和稳定性要求严格。此外, 根据传感

器安装位置, 可分为眼在手上(传感器安装在末端执行器上, 适用于动态目标跟踪)和眼在手外(固定安装, 适合静态目标定位与装配)两种构型。

2 工业机器人视觉伺服系统关键技术

2.1 图像采集与预处理技术

图像采集是视觉伺服系统获取环境信息的基础, 其质量直接影响后续处理效果。工业相机作为核心采集设备, 需依据应用场景选型: 高速运动目标检测需高帧率相机避免运动模糊; 微小零件装配则依赖高分辨率相机捕捉细节。镜头畸变校正同样关键, 通过标定板测量畸变参数并校正, 可有效减少几何失真, 提升测量精度。图像预处理可通过中值滤波、高斯滤波、直方图均衡化、图像配准等滤波、降噪、增强等手段改善图像质量, 通过寻找图像特征对应关系, 实现多视角或不同时刻图像的对齐与信息融合, 为机器人提供更全面的环境感知, 保障视觉伺服系统稳定运行。

2.2 目标识别与定位技术

目标识别与定位是视觉伺服系统的核心任务, 旨在从图像中精准提取目标物体的位置与姿态信息。传统方法如SIFT、SURF依赖人工设计特征, 通过提取局部特征点匹配实现识别, 但存在计算复杂、易受光照和遮挡干扰的缺陷。深度学习的发展推动了目标识别技术革新, 基于CNN的YOLO、FasterR-CNN等算法, 通过大规模数据集训练, 自动学习目标外观、形状特征, 在精度和速度上远超传统方法, 可快速识别目标并输出位置与类别信息^[2]。目标定位方面, 基于模型的方法通过建立三维模型与图像匹配计算位姿; 模板匹配法通过搜索图像中与模板最相似区域确定位置。深度学习回归网络则能直接从图像回归目标三维位姿, 为机器人提供精确控制参数, 显著提升视觉伺服系统对目标的定位准确性和实时性。

2.3 视觉伺服控制算法

视觉伺服控制算法是连接视觉信息与机器人运动的关键，直接决定系统的控制精度与响应速度。传统算法中，PID控制通过调节比例、积分、微分参数，实时调节视觉反馈误差，结构简单且鲁棒性强，但在处理复杂非线性系统时效果欠佳。为克服传统算法局限，智能控制算法逐渐被应用。模糊控制利用模糊逻辑规则处理不精确视觉信息，无需精确数学模型，能适应复杂环境；神经网络控制通过训练多层网络，学习视觉误差与控制量的映射关系，实现非线性系统高精度控制。基于优化的模型预测控制（MPC），通过预测系统未来状态，在有限时域内求解最优控制序列，可有效处理约束条件，提升系统动态性能与稳定性。这些算法的应用与融合，为工业机器人视觉伺服系统实现更精准、智能的控制提供了技术支撑，展现出广阔的应用前景。

2.4 手眼标定技术

在眼在手上构型中，需标定相机坐标系与机器人末端执行器坐标系的关系；在眼在手外构型中，则要标定相机坐标系与机器人基坐标系的关系。传统的手眼标定方法基于几何模型，通过拍摄标定板的不同姿态图像，利用透视变换原理建立方程求解转换参数。Tsai两步法、张正友标定法等经典方法在一定程度上提高了标定精度，但存在计算复杂、对环境要求高的问题。近年来，基于深度学习的手眼标定方法为该领域带来新的突破。通过构建端到端的神经网络模型，直接从图像数据中学习坐标系之间的转换关系，避免复杂的几何计算，提高了标定效率与精度，尤其适用于动态环境下的快速标定。

3 工业机器人视觉伺服系统在自动化装配中的应用场景

3.1 电子设备装配

在电子设备制造领域，随着5G、人工智能等技术的飞速发展，产品集成度日益提升，零部件愈发微小精密，对装配精度的要求达到了纳米级。工业机器人视觉伺服系统在电子设备装配中扮演着不可或缺的关键角色，成为保障产品质量和生产效率的核心技术。以手机主板装配为例，手机主板上集成了处理器芯片、电容、电阻等数以百计的微小元件，单个芯片尺寸甚至不足1平方厘米，且引脚间距极小。视觉伺服系统首先通过配备的高精度工业相机，以每秒数十帧的速度采集主板与零部件的高清图像，这些图像分辨率可达数微米级别，能够清晰捕捉元件的每一个细节。随后，利用先进的深度学习目标识别技术，如基于CNN的YOLO算法，快速定位芯片、电容等元件的精确位置与姿态，即使元件存在微小旋转或偏移，也能准确识别。最后，借助视觉伺服控

制算法，将识别结果转化为机器人末端执行器的运动指令，实现元件的精准贴装，贴装精度可控制在 ± 5 微米以内，极大降低了因人工操作或机械误差导致的虚焊、错位等问题，使手机主板的良品率提升至99%以上。在显示屏与外壳的组装过程中，由于显示屏玻璃材质脆弱，对抓取力度和位置精度要求极高。视觉伺服系统通过多个角度的工业相机实时检测显示屏的位置偏差，一旦发现偏差，立即通过复杂的运动学模型自动调整机器人的抓取与放置姿态，确保显示屏与外壳的完美契合。

3.2 汽车零部件装配

汽车制造是一个高度复杂且精密的产业，涉及成千上万零部件的装配，部分关键工序对精度和效率的要求近乎严苛。工业机器人视觉伺服系统在汽车零部件装配中发挥着至关重要的作用，有效保障了汽车的性能和质量。在发动机装配中，发动机作为汽车的核心部件，其内部结构精密，缸体、活塞等零部件的尺寸精度和装配位置直接影响发动机的动力输出和燃油经济性。视觉伺服系统通过多个高精度工业相机和三维激光扫描仪协同工作，能够快速获取零部件的三维几何信息，构建出高精度的数字模型^[3]。然后，利用基于模型的匹配算法，对缸体、活塞等零部件进行尺寸检测与定位，检测精度可达 ± 0.01 毫米。系统还能实时监测装配过程中的零部件位置偏差，一旦发现异常，立即通过视觉伺服控制算法调整机器人的装配动作，确保各部件安装位置准确无误，避免因装配误差导致的发动机抖动、功率下降等问题，提高发动机的整体性能和可靠性。在汽车座椅装配环节，汽车座椅由骨架、海绵垫、面料等多个部件组成，且不同车型的座椅结构和尺寸存在差异。视觉伺服系统首先通过图像识别技术，快速识别座椅骨架、海绵垫等部件的特征和型号，然后根据预设的装配工艺，自动规划机器人的装配路径。在装配过程中，系统还可对每个装配步骤进行实时监控，利用深度学习算法分析图像，及时发现装配缺陷，如螺丝漏装、海绵垫错位等问题，并自动报警提示，便于工人及时处理。

3.3 家电产品装配

家电产品品类繁多，结构复杂，装配时需处理多种零部件，对精度和效率要求颇高。工业机器人视觉伺服系统成为提升家电生产质量与效率的核心技术，为企业带来显著效益。在冰箱装配中，门体和抽屉的装配精度关乎冰箱密封性与使用体验。视觉伺服系统通过多台工业相机，对这些部件进行全方位定位与对齐。先运用边缘检测算法勾勒部件轮廓，再借助三维重建技术获取其空间位置，依据装配标准计算机器人调整参数。装配过

程中,机器人依据视觉反馈实时调整安装力度和角度,确保部件紧密贴合,减少缝隙,提升冰箱密封性,降低能耗。同时系统还能对装配后的冰箱外观进行检测,利用图像识别技术找出划痕、凹陷等缺陷,有效提高产品出厂合格率。空调外机装配时,压缩机、散热片等关键部件的安装精度直接影响空调制冷效果与使用寿命。视觉伺服系统结合高精度工业相机和激光测距仪,精准识别部件位置与姿态,引导机器人完成精准安装。安装过程中,系统持续监测部件安装位置与紧固程度,一旦发现偏差或松动,立即报警并暂停装配,避免因安装不当引发故障。系统还会对装配完成的外机进行外观检测,识别外壳上的划痕、污渍等瑕疵,严格把控产品质量,确保每一台空调外机都符合出厂标准。

4 工业机器人视觉伺服系统在自动化装配中的优化策略

4.1 技术优化措施

在技术层面,持续优化图像采集与处理算法是提升系统性能的关键。采用先进的图像降噪算法,如深度学习中的去噪自编码器,可进一步提高图像质量;优化目标识别算法,结合迁移学习技术,在少量标注数据的情况下,快速训练出高精度的识别模型,适应不同产品的装配需求。在控制算法方面,融合多种智能控制策略,如将模糊控制与神经网络控制相结合,充分发挥两者优势,提高系统对复杂环境的适应性与控制精度。同时引入强化学习算法,使系统能够在实际运行过程中不断学习优化控制策略,实现自主决策与自适应调整。

4.2 设备升级与选型

合理的设备选型与升级是提高系统性能的重要保障。在图像采集设备方面,选择更高分辨率、更高帧率的工业相机,配合高性能镜头,提升图像采集质量。同时,考虑引入多光谱相机、三维激光雷达等新型传感器,获取更丰富的环境信息,为机器人提供更全面的感知能力^[4]。在机器人本体选型上,根据装配任务需求,选

择负载能力、运动精度、重复定位精度匹配的工业机器人。对于高精度装配任务,可选用并联机器人或协作机器人,提高装配效率与精度。此外,定期对设备进行维护与升级,更换老化部件,确保系统长期稳定运行。

4.3 系统集成优化

系统集成优化旨在实现视觉伺服系统与工业生产流程的深度融合。通过建立统一的通信协议,实现视觉系统、机器人控制系统与生产线其他设备之间的数据交互与协同工作。采用数字孪生技术,在虚拟环境中对装配过程进行仿真模拟,提前优化系统参数与装配流程,减少实际调试时间与成本。构建智能监控与故障诊断系统,实时监测系统运行状态,对视觉传感器故障、机器人运动异常等问题进行预警与诊断,并自动生成解决方案,提高系统的可靠性与可维护性,实现工业机器人视觉伺服系统在自动化装配中的高效稳定运行。

结束语

工业机器人视觉伺服系统凭借实时感知与精准控制能力,已成为自动化装配的核心技术,有效解决了传统装配精度低、效率差的问题,其在多行业的成功应用,推动了智能制造的发展。未来,随着算法优化、设备升级与系统集成度提高,视觉伺服系统将更智能、高效,在自动化装配领域发挥更大作用,助力工业生产向更高精度、更柔性化方向迈进。

参考文献

- [1]赵俊,程伟.机器人视觉识别技术在自动化装配中的应用研究[J].机械工程与自动化,2021,34(8):112-118.
- [2]许志远,杜雪华.基于深度学习的视觉识别系统优化方法及应用[J].工业自动化,2022,45(3):45-51.
- [3]杨桂林.工业机器人运用技术[J].中国科学院院刊,2020,30(6):785-792.
- [4]韩建萍,魏诚.工业机器人视觉系统在电气自动化中的应用[J].机械设计,2021,38(04):158-159.112