

基于机器视觉的工业机器人装配精度在线校准技术

罗坤

易门铜业有限公司，云南省玉溪市，651100；

摘要：随着工业自动化的飞速发展，工业机器人在装配领域的应用愈发广泛，其装配精度直接影响产品质量与生产效率。本文针对工业机器人装配精度在线校准问题，提出一种基于机器视觉的校准技术。通过构建机器视觉测量系统，实现对机器人末端执行器及工件的高精度定位与姿态检测，结合误差分析模型完成装配精度的在线校准。实验结果表明，该技术可有效提升工业机器人的装配精度，降低校准成本，满足现代化工业生产的高精度需求。

关键词：机器视觉；工业机器人；装配精度；在线校准；误差分析

DOI：10.69979/3060-8767.25.09.017

1 引言

1.1 研究背景

在制造业智能化转型中，工业机器人因高效、稳定、灵活成为自动化生产线核心，尤其精密装配领域对其装配精度要求极高。但长期运行后，受机械磨损、温度变化等因素影响，机器人运动精度下降，装配误差增大，可能导致产品报废和生产停滞。

传统离线校准需拆卸机器人，用高精度设备校准，耗时费力且影响生产，难以满足高实时性场景。因此，研发高效精准的在线校准技术，实现装配精度实时监测与动态调整，具有重要理论意义和实际应用价值。

1.2 国内外研究现状

国外在工业机器人精度校准领域起步早、技术成熟。如瑞士ABB的激光跟踪校准系统可快速校准绝对定位精度，德国KUKA采用视觉引导技术调整装配精度，但这些技术成本高、对工作环境要求苛刻。

国内近年研究进展显著，哈工大、清华大学等高校深入研究误差建模与校准方法，提出基于视觉测量的运动学参数辨识方法，提升了定位精度。但现有研究多为实验室静态校准，复杂工业环境下的在线动态校准技术尚需完善。

1.3 研究目的与意义

本文旨在研究基于机器视觉的工业机器人装配精度在线校准技术，通过构建适用于工业现场的机器视觉测量系统，实时检测装配关键参数并进行误差补偿，以提高机器人装配精度和稳定性。

本研究意义重大：一是突破传统离线校准局限，实现在线实时校准，减少停机时间，提升生产效率；二是降低对高精度测量设备的依赖，借机器视觉降本，提高技术普及性；三是为工业机器人智能化升级提供支持，

推动制造业向高精度、高质量发展。

2 基于机器视觉的工业机器人装配精度在线校准技术原理

2.1 机器视觉测量系统构成

机器视觉测量系统是实现工业机器人装配精度在线校准的核心部分，主要由图像采集模块、图像预处理模块、特征提取与匹配模块以及坐标转换模块组成。

图像采集模块：该模块主要由工业相机、镜头、光源等组成。工业相机选用高分辨率CCD相机，确保能够清晰拍摄工件及机器人末端执行器的图像；镜头根据测量范围和精度要求进行选择，以保证图像的清晰度和畸变率在允许范围内；光源采用环形LED光源，提供均匀稳定的照明，减少环境光对图像质量的影响。

图像预处理模块：由于工业现场环境复杂，采集到的图像可能存在噪声、模糊等问题，需要进行预处理。预处理过程包括图像去噪、图像增强、图像分割等。图像去噪采用中值滤波算法，有效去除椒盐噪声；图像增强通过对比度调整和灰度变换，提高图像的清晰度；图像分割采用阈值分割法，将目标区域从背景中分离出来。

特征提取与匹配模块：从预处理后的图像中提取具有代表性的特征点，如角点、边缘点等。特征提取采用SIFT算法，该算法具有尺度不变性和旋转不变性，能够在不同姿态和光照条件下准确提取特征点。特征匹配通过计算特征点之间的相似度，实现目标图像与模板图像的匹配，从而确定目标的位置和姿态。

坐标转换模块：将图像坐标系中的特征点坐标转换为机器人基坐标系中的坐标。通过相机标定获取相机的内参和外参，建立图像坐标系与世界坐标系之间的转换关系，再结合机器人运动学模型，将世界坐标系中的坐标转换为机器人基坐标系中的坐标。

2.2 工业机器人装配误差分析

工业机器人的装配误差主要来源于机器人本身的运动误差、末端执行器的安装误差以及工件的定位误差等。

机器人运动误差：机器人运动误差是由于机器人运动学参数的不准确引起的，包括关节角度误差、连杆长度误差、连杆扭转角误差等。这些误差会导致机器人末端执行器的实际位置与理论位置存在偏差。

末端执行器安装误差：末端执行器与机器人手腕之间的安装误差会影响末端执行器的姿态和位置精度。安装误差主要包括平移误差和旋转误差。

工件定位误差：在装配过程中，工件的定位精度直接影响装配质量。工件定位误差主要由工件的放置位置不准确、夹具的定位精度不高等因素引起。

为了准确描述工业机器人的装配误差，建立误差模型是关键。本文采用D-H参数法建立机器人运动学模型，通过辨识机器人运动学参数误差来分析机器人运动误差。对于末端执行器安装误差和工件定位误差，通过机器视觉测量系统进行检测和量化。

2.3 在线校准原理

基于机器视觉的工业机器人装配精度在线校准原理是通过机器视觉测量系统实时检测机器人末端执行器和工件的位置与姿态，将测量结果与理论值进行比较，得到装配误差。根据装配误差，结合机器人误差模型，计算出需要补偿的参数，通过机器人控制系统对机器人的运动轨迹进行调整，实现装配精度的在线校准。

具体来说，在线校准过程包括以下几个步骤：

初始化：在机器人开始装配前，对机器视觉测量系统进行标定，获取相机的内参和外参；对机器人进行零位校准，确定机器人的初始姿态。

实时测量：在装配过程中，机器视觉测量系统实时拍摄机器人末端执行器和工件的图像，经过预处理、特征提取与匹配以及坐标转换等步骤，得到末端执行器和工件在机器人基坐标系中的位置和姿态。

误差计算：将测量得到的末端执行器和工件的位置与姿态与理论值进行比较，计算出装配误差。

误差补偿：根据装配误差和机器人误差模型，计算出需要补偿的机器人运动学参数，通过机器人控制系统对机器人的运动轨迹进行调整，实现装配精度的在线校准。

3 基于机器视觉的工业机器人装配精度在线校准系统设计

3.1 硬件系统设计

硬件系统是实现基于机器视觉的工业机器人装配

精度在线校准的基础，主要包括工业机器人、机器视觉测量设备、控制系统等。

工业机器人：选用六自由度工业机器人，该机器人具有较高的运动精度和灵活性，能够满足复杂装配任务的需求。机器人的重复定位精度不低于 $\pm 0.02\text{mm}$ ，最大负载根据装配工件的重量进行选择。

机器视觉测量设备：包括工业相机、镜头、光源、图像采集卡等。工业相机选用分辨率为 2048×1536 的CCD相机，帧率为30fps；镜头选用焦距为16mm的工业镜头，畸变率小于1%；光源采用环形LED光源，亮度可调；图像采集卡选用PCIe接口的高速图像采集卡，支持实时图像采集和传输。

控制系统：由机器人控制器和上位机组成。机器人控制器负责控制机器人的运动，接收上位机发送的控制指令；上位机采用工业计算机，安装有机器视觉测量软件和校准算法软件，负责图像处理、误差计算和误差补偿指令的生成。

3.2 软件系统设计

软件系统是实现在线基于机器视觉的工业机器人装配精度在线校准的核心，主要包括图像采集与处理模块、特征提取与匹配模块、误差计算与补偿模块以及人机交互模块。

图像采集与处理模块：该模块负责控制工业相机进行图像采集，并对采集到的图像进行预处理。图像采集采用触发式采集方式，当机器人运动到指定位置时，触发相机拍摄图像；图像预处理包括图像去噪、图像增强、图像分割等操作，提高图像质量。

特征提取与匹配模块：从预处理后的图像中提取特征点，并进行特征匹配。特征提取采用SIFT算法，特征匹配采用FLANN匹配算法，提高匹配速度和准确性。

误差计算与补偿模块：根据特征匹配结果，计算出机器人末端执行器和工件的位置与姿态误差，并根据误差模型计算出需要补偿的参数，生成误差补偿指令发送给机器人控制器。

人机交互模块：提供友好的人机交互界面，操作人员可以通过该界面设置校准参数、查看校准过程和结果等。

3.3 系统工作流程

基于机器视觉的工业机器人装配精度在线校准系统的工作流程如下：

系统初始化：操作人员通过人机交互界面设置校准参数，如测量范围、精度要求等；对机器视觉测量系统进行标定，获取相机内参和外参；对机器人进行零位校

准。

机器人运动：机器人按照预设的轨迹运动，当运动到指定测量位置时，触发工业相机拍摄机器人末端执行器和工件的图像。

图像处理与特征匹配：图像采集卡将采集到的图像传输到上位机，上位机对图像进行预处理、特征提取与匹配，得到末端执行器和工件在图像坐标系中的位置和姿态。

坐标转换与误差计算：将图像坐标系中的位置和姿态转换为机器人基坐标系中的坐标，与理论值进行比较，计算出装配误差。

误差补偿：根据装配误差和误差模型，计算出需要补偿的机器人运动学参数，生成误差补偿指令发送给机器人控制器，机器人控制器根据指令调整机器人的运动轨迹。

重复校准：重复步骤 2-5，直到装配误差在允许范围内。

4 实验验证与结果分析

4.1 实验 setup

实验设备：本实验选用的工业机器人为 ABBIRB1200，

表 1 传统校准方法与基于机器视觉的在线校准方法性能对比

对比项目	传统校准方法	基于机器视觉的在线校准方法
校准后定位精度	±0.05mm	±0.03mm
单次校准时间	2-3 小时	10-15 分钟
设备成本	较高（需激光跟踪仪等）	较低
人工成本	较高（需专业技术人员）	较低（自动化程度高）
校准后装配误差	±0.06mm	±0.04mm

校准精度分析：由表格可知，基于机器视觉的在线校准方法校准后机器人的定位精度更优，高于传统校准方法。**校准时间分析：**基于机器视觉的在线校准方法完成一次校准的时间远短于传统校准方法，大大缩短了校准时间，提高了生产效率。

成本分析：传统校准方法设备和人工成本均较高，而基于机器视觉的在线校准方法在这两方面成本更低。

装配误差分析：采用基于机器视觉的在线校准方法后，机器人装配误差更小，能有效提高装配质量。综上所述，基于机器视觉的工业机器人装配精度在线校准技术在校准精度、校准时间和成本方面均具有明显优势，能够满足工业生产对高精度、高效率装配的需求。

5 结论与展望

研究结论：本文构建机器视觉测量系统，实现机器人末端执行器和工件的实时定位与姿态检测，结合误差分析模型提出在线校准方法，经实验验证有效。该方法

其重复定位精度为±0.02mm；机器视觉测量系统包括 BasleracA2040-90um 工业相机、ComputarM1620-MP2 镜头、环形 LED 光源以及图像采集卡；上位机为配备 IntelCorei7 处理器、8GB 内存的工业计算机。

实验对象：选取一个具有典型特征的机械零件作为装配工件，该零件上有多个用于定位的孔和平面。

实验环境：实验在恒温恒湿的实验室环境中进行，环境温度为 25±1℃，相对湿度为 50±5%，以减少环境因素对实验结果的影响。

4.2 实验方法

传统校准方法实验：采用激光跟踪仪对工业机器人进行离线校准，记录校准前后机器人的定位精度。

基于机器视觉的在线校准方法实验：启动基于机器视觉的工业机器人装配精度在线校准系统，按照系统工作流程进行在线校准，记录校准前后机器人的定位精度和装配误差。

对比分析：对两种校准方法的校准时间、校准精度以及成本进行对比分析。

4.3 实验结果与分析

将机器人定位精度提升至±0.03mm，装配误差降至±0.04mm，校准时间缩至 10-15 分钟，优于传统方法，还降低了设备依赖与成本，提高了生产效率。

研究展望：未来需完善系统，提高抗干扰能力以适应复杂工业环境；拓展校准范围，研究机器人动态参数在线校准；实现多机器人协同校准；引入人工智能技术提升校准智能化与自适应化水平，该技术前景广阔，将助力制造业智能化升级。

参考文献

- [1] 许凡. 视觉引导的抓取机器人控制技术的研究与开发[D]. 江南大学[2025-08-05]. DOI:CNKI:CDMD:2.1014.380442.
- [2] 许翰卿, 胡欢, 李天剑, 等. 一种基于机器视觉的轴孔装配控制方法[J]. 机床与液压, 2025(9).
- [3] 蒋琳. 基于人工智能的工业机器人智能感知技术研究[J]. 安家, 2024(2):0190-0192.