工业机器人视觉引导系统在精密装配线上的应用可靠性分析

吴建亭

（广东晟盈智能装备有限公司，广东 东莞 523808）

摘 要 工业机器人视觉引导系统在精密装配中的可靠性取决于标定、识别、定位与对位装配全链路的误差控制能力，单一环节的精度提升难以解决误差在传递过程中的耦合放大问题。本文从全链路误差传递机制切入，分析相机标定、工件识别、位姿解算与机器人对位装配各环节的误差源及其耦合效应，识别视觉标定漂移与定位精度衰减、光照条件波动与工件识别的一致性退化等典型扰动与失效模式，提出基于误差溯源的标定漂移补偿、光照自适应处理与特征鲁棒性增强、多源传感冗余与装配力控的协同验证的可靠性增强策略，并结合典型装配工况进行验证，以期为相关人员提供参考。

关键词 工业机器人；视觉引导；精密装配；全链路误差源；误差传递

中图分类号：TP242.2 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.014

0 引言

精密装配线对工业机器人视觉引导系统的定位精度要求通常在微米至亚毫米级，系统在实验室标定环境下表现出的精度指标与产线长期运行后的实际表现之间存在明显落差。视觉标定漂移、光照条件波动、工件一致性偏差等因素在单一环节评估中看似可控，但在全链路叠加后引发的末端装配偏差往往超出预期。已有研究多聚焦标定算法或识别精度的单向优化，对误差在标定、识别、定位、装配链路上的传递机制分析不足。本文从误差传递与耦合的视角切入，分析工业机器人视觉引导系统的可靠性影响因素，提出针对性的增强策略，并结合典型工况加以验证。

1 工业机器人视觉引导系统在精密装配线上的误差传递机制

1.1 全链路误差源解析

工业机器人视觉引导系统的误差并非产生于单一环节，而是沿着“相机标定→工件识别→特征匹配→位姿解算→机器人对位装配”这一链路逐级传递并累积的。

相机标定环节的内外参标定精度构成后续所有视觉测量结果的基准，标定残差会直接映射到工件位置的测量值中[1]。工件识别环节依赖于对工件边缘、角点或特定纹理特征的稳定提取，光照变化与工件表面状态差异均会影响特征提取的一致性。位姿解算环节将二维图像特征转换为三维空间坐标，解算精度取决于特征匹配的准确性与标定参数的可靠性。

1.2 误差传递的耦合放大效应

各环节误差在传递过程中并非简单叠加，而是存在耦合放大效应。

标定残差在特征匹配时产生初始偏移，该偏移经位姿解算后转化为末端装配偏差，偏差量在传递过程中被逐级放大。光照波动对标定和识别两个环节同时产生扰动，标定板在不同光照下的对比度差异影响角点提取精度，工件表面反光特性变化影响特征识别的一致性，两个环节的偏差在位姿解算阶段叠加后，末端装配偏差呈非线性增大趋势。耦合放大效应的存在意味着即使各单一环节的精度指标均在允许范围内，全链路累积后的末端偏差仍可能超出装配公差要求，这也是视觉引导系统在实验室环境下表现良好而在产线长期运行中可靠性下降的重要原因。

2 精密装配工况下工业机器人视觉引导系统的典型扰动与失效模式

2.1 视觉标定漂移与定位精度衰减

工业机器人视觉系统在连续运行中受温度变化、机械振动和安装结构微变形的影响，相机内外参数会产生缓慢漂移。这种漂移不是突然发生的，单次漂移

作者简介：吴建亭（1991-），男，本科，工程师，研究方向：智能产线与机器视觉。

量在几微米量级时系统仍能维持正常工作，定位偏差在装配公差范围内，过程监控很难发现异常。但经过数周或数月的累积后，末端定位偏差逐渐超出装配公差允许范围，产品一致性开始出现波动。标定漂移的隐蔽性在于它不是突发故障，而是渐进退化，从初始标定精度到超出公差范围的全过程可能没有任何报警信号，往往在批量性质量波动出现后才被发现。定期标定维护周期过长、对漂移累积的监测手段缺失，是这类失效在产线中反复出现的深层原因。

2.2 光照条件波动与工件识别的一致性退化

精密装配线环境中的光照条件并非稳定可控，车间照明变化、工件表面油污或氧化导致的反射特性差异、相邻工位设备遮挡产生的局部阴影，都会影响视觉系统对工件特征的稳定提取。光照波动对精密装配的影响比对一般搬运或分拣更为敏感，后者对识别精度的容忍度较高，即便特征提取出现小幅偏移，抓取成功率未必受到明显影响；前者在亚毫米级定位要求下，微小的特征偏移即可能导致装配位置偏差，造成卡件、过压或装配不到位。实际产线中完全依赖单一光源和固定阈值进行特征提取的做法，对光照变化的适应能力有限，环境光条件稍有波动，特征识别的一致性和稳定性就会受到干扰。

2.3 多批次工件一致性偏差引发的位置补偿失效

同一型号不同批次的工件在尺寸公差、边缘毛刺和表面纹理上存在差异，视觉系统在示教阶段建立的模板与实际运行中识别的工件特征之间存在偏差。当工件一致性偏差超过视觉系统预设的匹配容忍度时，位置补偿算法会出现收敛到局部最优而非全局最优的问题，补偿后的位姿与实际装配位姿之间产生残余偏差。以电子连接器插装为例，不同批次的连接器外壳注塑成型后边缘毛刺的分布位置和尺寸可能不同，视觉系统在示教时以光滑边缘建立的模板，在实际运行中遇到带有毛刺的工件时，识别出的边缘位置存在微小的系统性偏移，会误导系统做出错误的位置补偿，结果是批量装配中同类型位姿偏差反复出现，而不是随机性失误。

3 工业机器人视觉引导系统在精密装配线上的应用可靠性增强策略

3.1 基于误差溯源的标定漂移补偿

标定漂移的累积性决定了它不能仅靠出厂时的一次标定来解决，需要建立定期校准与漂移补偿的常态化机制[2]。比较实用的做法是在装配工位上设置一个固定参考基准，比如一块位置已知且精度经过验证的标定板或基准块，机器人按预设周期移动末端执行器至基准位置，视觉系统采集基准图像后与初始标定时的基准数据进行比对，计算出当前的标定漂移量并自动补偿修正值。漂移量超过预设阈值时触发重标定流程，阈值可以根据装配公差倒推确定，一般设定为装配允许误差的 1/3 到 1/2 比较合适，留出余量给后续的识别和定位误差（见表 1）。

表 1 标定漂移补偿的关键参数与设定依据

参数名称	设定依据	精密装配典型取值范围
校准触发阈值	装配允许误差的 1/3 至 1/2	5 μm～15 μm
基准件精度等级	高于装配公差一个数量级	1 μm～3 μm
初始校准间隔	投用初期漂移速率尚未稳定	1 周～2 周
稳定期校准间隔	根据累积漂移数据动态调整	1 个月～3 个月

校准周期的确定不是固定不变的，系统刚投用阶段可以适当缩短校准间隔，积累一段时间的漂移数据后，根据漂移速率的变化趋势动态调整校准频率，比固定周期校准更贴合实际运行状态。

3.2 光照自适应处理与特征鲁棒性增强

光照波动对精密装配的影响不像标定漂移那样隐蔽，但它的随机性更强，往往和车间白夜班交替、天气变化、设备维护后的环境光条件变化绑定在一起。

从硬件层面看，光源配置上采用多角度组合光源配合漫反射板，能在一定程度上抵消工件表面反光特性变化对特征提取的干扰，偏振滤光片也可以滤除一部分金属表面的镜面反射。从软件层面看，光照自适应处理的关键是让算法对不同光照条件下的图像有相对稳定的响应，直方图均衡化和自适应阈值处理能在一定范围内补偿整体亮度变化，对局部阴影的改善效果则有限。更有效的做法是在特征模板训练阶段就引入多光照条件下的工件图像样本，让算法学习不同光照条件下工件特征的表现差异，提高匹配鲁棒性。这种做法前期需要额外采集一些数据，但一旦完成训练，在后续运行中就不需要频繁调整参数。实际应用中可

以将光源硬件的优化和算法训练的优化结合起来，硬件兜底常规光照波动，算法弥补硬件的适应死角，两方面的改善叠加起来效果会比单一措施可靠得多。

3.3 多源传感冗余与装配力控的协同验证

工业机器人视觉系统在精密装配中承担的是“看”的角色，但仅靠视觉定位在某些工况下存在局限性，工件表面反光过强或过弱、特征局部被遮挡、环境光突变导致识别失败，这些问题在纯视觉方案下都会直接导致装配偏差。

引入力觉传感作为辅助手段，相当于为系统增加了一个独立的验证通道[3]。机器人在装配过程中通过末端力传感器实时监测装配力变化，正常装配时力变化曲线呈现特定的规律，即初始接触时力缓慢上升，工件进入导向槽时力趋于平稳，装配到位时力再次上升到达预设值[4]。当视觉定位出现偏差，工件与装配位置之间存在位置差时，接触力的变化曲线会偏离正常规律，表现为力上升过快或接触位置异常，系统可以据此判断视觉定位可能出现问题，触发二次定位或停机待处理。视觉与力觉的协同不是简单的并联冗余，而是分工协作，视觉负责快速定位，力觉负责精细验证和异常拦截，两者的优势互补。

4 典型装配工况下工业机器人视觉引导系统的应用可靠性验证

选取某医用缝合线热硬化装针全自动生产线上缝合线和缝合针的精密装配工序作为验证场景，该工序要求视觉引导系统精准定位缝合线线头，对齐目标工位后完成穿针装配，工序允许的最大装配位置偏差为 ±0.05 mm。产线连续运行三个月，其间经历了白夜班交替、多批次物料切换、设备维护停机及重启等全工况生产状态，本次验证未人为干预、调整原有生产节奏，完全贴合实际量产工况。

验证期间采集了三类关键数据。在标定漂移方面，在装配工位设置固定基准块，每周开展一次在线精度比对，三个月内设备最大标定漂移量控制在 4 μm 以内，未超出 8 μm 的预设校准阈值，全程未触发设备重标定流程，视觉定位基准稳定性良好。在光照波动方面，车间白班和夜班的照度差约 30%，夜班工件特征识别的一致性在启用光照自适应处理后与白班基本持平，没有出现因光照变化导致的匹配失败。在工件一致性方面，三个月量产周期内共切换四批次缝合线与缝合针医用物料，其中单批次缝合线截面轮廓与初始示教模板存在明显差异，视觉系统在初期出现了约 0.03 mm 的定位偏差，触发了力觉异常检测，后续通过优化匹配模板参数，快速恢复标准装配定位精度，保障了产线持续稳定生产。

王新等[5]搭建的工业机器人单目视觉装配系统以法兰盘为装配对象进行实验测试，采用 Eye-in-hand 式手眼系统完成相机标定与手眼标定，通过椭圆检测识别零件轮廓并结合外部标记辅助实现位姿解算。10 次装配实验结果表明，系统最大位置误差为 3.97 mm，最小位置误差为 2.07 mm，姿态角最小误差为 0.13°。该研究针对金属零件弱纹理及无角点特征的位姿估计问题提出了解决方案，但实验在实验室条件下完成，位置误差在毫米级，与精密装配要求的微米至亚毫米级定位精度存在差距，系统在长期连续运行中的可靠性数据也有待积累。

综合来看，本文验证的视觉引导系统在真实产线工况下承受住了标定漂移、光照波动和工件一致性变化这三个方面的持续扰动，基于误差溯源的漂移补偿、光照自适应处理和力觉协同验证三种策略的组合应用对提升系统长期运行可靠性具有实际效果。与实验室条件下的装配实验相比，产线连续运行验证更能反映系统在复杂工况下的真实可靠水平。

5 结束语

工业机器人视觉引导精密装配系统的运行可靠性，依托标定、目标识别、空间定位与对位装配全流程的误差管控水平。各工序误差逐级传递并相互耦合放大，是设备长期工作后装配精度逐步衰减的关键诱因。标定漂移、光照条件波动、工件制造一致性偏差是现场三类主要干扰因素，仅优化单一环节参数无法满足整体精度要求。本文采用误差溯源思路，通过标定漂移补偿、光照自适应图像处理、视觉力觉协同验证方案抑制误差累积。产线实测表明，整套方法可将末端定位偏差稳定控制在装配公差区间。未来可针对多品种混线工况开展试验，完善策略通用性，推动误差预测模型嵌入产线平台，逐步实现由周期性维护转向预测性维护。

参考文献：

[1] 许鸿萍.视觉引导工业机器人的标定与工件识别方法研究[J].现代制造技术与装备,2024,60(11):210-212.
[2] 于冠军.工业机器人视觉定位系统高精度标定研究[J].机器人产业,2022(03):92-94.
[3] 崔坤坤,段晋军,姜锦程,等.基于视/力多源信息融合的机器人精密装配研究[J].机械制造与自动化,2023,52(05):6-10.
[4] 张平华.多机器人协作中提高装配精度的几种方法分析[J].机电信息,2022(10):47-51,55.
[5] 王新,郭俊.工业机器人单目视觉装配系统研究[J].机械设计与制造,2024(06):342-347.