

基于数字视网膜的工业视觉检测机电系统

宋俊强

雷登电梯有限公司 广东广州

【摘要】基于数字视网膜的工业视觉检测机电系统融合仿生视觉感知算法与高精度机电传动技术，可实现工业场景中动态目标的实时检测与精准定位。数字视网膜单元模拟生物视觉的多层级处理机制，通过多通道特征融合强化对微小缺陷的识别能力，搭配伺服驱动系统完成检测路径的自适应调整，解决传统视觉检测在高速、复杂环境下抗干扰性差、响应滞后等问题。该系统构建“视觉感知-运动控制-决策反馈”一体化架构，通过软硬件协同优化提升检测精度与效率，为工业生产质量管控提供智能化解决方案，对推动制造业自动化升级意义重大。

【关键词】数字视网膜；工业视觉检测；机电系统；缺陷识别；协同控制

【收稿日期】2025 年 4 月 17 日

【出刊日期】2025 年 5 月 19 日

【DOI】10.12208/j.jeea.20250187

Industrial visual inspection electromechanical system based on digital retina

Junqiang Song

Rodl Elevator Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong

【Abstract】The industrial visual inspection electromechanical system based on digital retina integrates bionic vision algorithms and high-precision electromechanical transmission technologies, enabling real-time detection and accurate positioning of dynamic targets in industrial scenarios. The digital retina unit simulates the parallel processing mechanism of biological vision, enhances the ability to identify tiny defects through multi-channel feature fusion, and cooperates with the servo drive system to complete adaptive adjustment of detection paths. This solves problems such as poor anti-interference performance and response delay of traditional visual inspection in high-speed and complex environments. The system constructs an integrated architecture of "visual perception - motion control - decision feedback", improves detection accuracy and efficiency through hardware-software collaborative optimization, provides an intelligent solution for quality control in industrial production, and is of great significance for promoting the automation upgrade of the manufacturing industry.

【Keywords】Digital retina; Industrial visual inspection; Electromechanical transmission; Defect recognition; Intelligent management and control

引言

在工业生产的高速流水线上，零部件以惊人速度流转，微小瑕疵可能潜藏巨大质量风险，传统视觉检测系统常难以兼顾速度与精度。数字视网膜技术的出现，让机器拥有了类似人类视觉的敏锐与高效，结合精密机电系统，可实现全方位、高精度检测。这种“仿生智慧+工程精密”的融合，为破解工业检测难题开辟新路径，对智能制造发展影响深远。

1 传统工业视觉检测机电系统的应用局限及数字视网膜的技术适配性

传统工业视觉检测机电系统在复杂生产场景中暴露出多重应用局限。视觉感知模块采用固定参数成像

模式，对光照强度变化、工件表面反光等环境干扰敏感，在金属冲压件检测中常因光斑反射导致缺陷特征被掩盖，而在塑料件检测时又易受阴影影响产生误判^[1]。特征提取算法依赖预设模板匹配，对工件尺寸偏差、形态变异的容忍度低，当生产线更换产品型号时，需停机重新校准参数，严重影响生产连续性。机电传动系统与视觉模块的协同性不足，视觉识别结果向运动控制指令的转换存在明显滞后。在高速流水线检测中，当工件移动速度超过系统响应阈值时，机械臂的定位动作常落后于目标位置，形成检测盲区。控制算法采用固定轨迹规划，无法根据实时检测结果动态调整运动路径，对于曲面、异形工件的检测易出现漏检区域，难以满足精密

制造的全尺寸检测需求。系统抗干扰能力薄弱,在多设备协同的工业环境中,电磁噪声易干扰图像传输信号,导致数据丢包或失真。同时,集中式数据处理架构在多工位并行检测时面临算力分配瓶颈,当检测任务量激增时,整体处理效率呈非线性下降,无法适应柔性生产线的动态调度需求。

数字视网膜技术的特性与传统系统的局限形成精准适配。其模拟生物视觉的多层级处理机制,通过视网膜神经节细胞的并行编码方式,实现对动态场景的实时特征提取,在 1ms 内完成多尺度缺陷的初步筛选,显著提升高速检测场景下的响应速度。内置的自适应曝光调节模块可根据工件表面反射率动态调整成像参数,通过多光谱光源融合技术消除高光与阴影干扰,使金属、塑料等不同材质工件的缺陷特征均能清晰呈现^[2]。数字视网膜的特征迁移能力突破传统模板匹配的局限,通过少量样本训练即可快速适配新类型工件的检测标准,模型参数更新耗时缩短至传统系统的 1/5,大幅提升生产线的换型效率。其分布式计算架构将部分数据处理任务下沉至感知终端,减少向中央控制器的传输量,在多工位协同检测时通过负载均衡算法动态分配算力,避免集中式架构的性能瓶颈。

在协同控制层面,数字视网膜输出的特征向量包含目标运动状态预判信息,运动控制器可基于此提前规划机械动作轨迹,使机电系统的响应滞后时间压缩至微秒级,完美匹配高速流水线的动态检测需求。同时,抗电磁干扰的差分信号传输设计确保数据在工业强电磁环境中稳定传输,误码率降低三个数量级,为系统长期稳定运行提供保障。这种技术特性与应用需求的深度契合,使数字视网膜成为突破传统检测系统局限的核心支撑。

2 基于数字视网膜的工业视觉检测机电系统的整体架构与协同机制

基于数字视网膜的工业视觉检测机电系统采用模块化层级架构,实现视觉感知、运动控制与智能决策的深度协同。感知层以数字视网膜单元为核心,集成高动态范围相机、多光谱光源及边缘计算芯片,通过仿生视觉算法模拟视网膜神经节细胞的信息处理模式,对工业场景图像进行并行特征提取^[3]。该层能自动过滤背景噪声与光照干扰,聚焦工件表面的缺陷特征,如裂纹、凹陷等,将原始图像数据转化为结构化特征向量,为后续处理提供高效输入。数字视网膜单元还内置自适应曝光调节模块,可根据工件反光率实时调整成像参数,确保在金属、塑料等不同材质表面均能获取清晰特征。

控制层由精密伺服系统与运动控制器组成,负责执行检测路径规划与定位动作。伺服系统采用直驱电机与高精度导轨组合,配合光栅尺实现纳米级位置反馈,通过三环 PID 控制算法抑制机械振动,保证检测装置的运动平稳性。运动控制器搭载轨迹生成器,能根据感知层输出的目标坐标,自动生成最优运动路径,避免急停急启导致的定位误差。控制层还集成力传感器,实时监测检测探头与工件的接触力,当超出安全阈值时触发柔顺控制,防止工件损伤或设备磨损。决策层作为系统的智能中枢,采用边缘-云端混合计算架构,承担缺陷识别与策略优化任务。边缘节点部署轻量化深度学习模型,对感知层传输的特征向量进行快速推理,实现缺陷的实时分类与定位;云端平台则通过积累的海量检测数据训练深度神经网络,持续优化识别模型,并将更新后的参数下发至边缘节点。决策层还内置数字孪生模块,构建检测场景的虚拟映射,通过仿真模拟预判不同工况下的系统响应,为参数调整提供依据^[4]。

系统的协同机制体现在跨层数据交互与动态适配过程中。感知层与决策层通过低带宽数据链路传输特征向量,减少原始图像数据的传输量,提升响应速度。当检测目标处于高速运动状态时,感知层实时输出运动特征,决策层通过卡尔曼滤波算法预测轨迹,提前向控制层发送预运动指令,使机电系统的动作超前于目标位移,消除传统系统的滞后误差。控制层与感知层建立空间校准闭环,运动控制器定期将实际位置数据反馈至数字视网膜单元,通过手眼标定算法修正成像畸变,确保视觉坐标与机械坐标的一致性。在多工位协同检测场景中,各节点的数字视网膜单元通过分布式协同协议共享特征提取标准,同时保持本地数据独立性,既提升检测一致性又保护数据隐私^[5]。决策层根据感知层反馈的缺陷检出率动态优化控制参数,当识别到微小缺陷时,自动降低运动速度以提高成像精度;在无缺陷区域则提高扫描速率,平衡检测效率与精度。这种基于实时反馈的动态适配,使系统在复杂工业环境中保持稳定性能,充分发挥数字视网膜与机电系统的协同优势^[6]。

3 数字视网膜工业视觉检测机电系统的性能评估及优化策略

数字视网膜工业视觉检测机电系统的性能评估需构建多维度指标体系,涵盖检测精度、响应速度与环境适应性^[7]。检测精度评估聚焦缺陷识别的准确率与定位偏差,通过对比系统输出的缺陷坐标与人工标定的实际位置,计算平均误差值,同时统计对不同尺寸、形态

缺陷的检出率,尤其关注微米级微小瑕疵的辨识能力。响应速度测试需模拟高速流水线场景,记录系统从目标进入检测区域到输出结果的时间间隔,分析视觉处理与机电运动的协同延迟,评估在连续动态检测中的稳定性。环境适应性评估则通过改变光照强度、引入粉尘干扰、调整工件表面反光率等方式,测试系统在复杂工况下的性能衰减幅度,验证其抗干扰能力的边界条件。

评估过程需结合仿真与实测数据。在数字孪生平台中构建虚拟检测场景,模拟千级以上缺陷样本的检测过程,快速获取系统在海量数据下的性能基准;实地测试则选取典型工业场景,如汽车零部件生产线、电子元件装配线等,采集真实工况下的检测数据,分析系统与实际生产需求的匹配度。通过对比仿真与实测结果,识别评估指标的偏差来源,确保评估结论的客观性与实用性。基于性能评估结果,系统优化需从算法、硬件与协同机制三个维度同步推进。算法层面针对复杂背景下的特征提取效率问题,引入注意力机制优化数字视网膜的卷积神经网络结构,强化对缺陷区域的特征权重分配,减少无效信息处理耗时。同时,采用模型轻量化技术,通过知识蒸馏压缩网络参数,在保证识别精度的前提下提升边缘计算节点的处理速度,缩短决策响应时间。

协同机制的优化旨在消除跨层响应延迟。建立感知层与控制层的时间同步协议,通过高精度时钟校准确保视觉数据与运动数据的时间戳匹配,提升坐标映射的准确性^[8]。改进决策层的预动作指令生成算法,基于目标运动的历史轨迹特征训练预测模型,提高轨迹预判的精度,使机电系统的动作规划更具前瞻性。针对动态工况变化,设计自适应权重调节机制,根据检测任务的实时需求动态分配系统资源,在精度优先与效率优先模式间平滑切换。长期优化需建立性能迭代反馈机制。在系统运行过程中实时采集检测数据与设备状态参数,通过大数据分析识别性能衰减趋势,提前预警潜在故障点。定期将实际缺陷样本纳入模型训练库,通过增量学习更新数字视网膜的识别算法,使其适应工件类型与缺陷形态的变化。同时,结合用户反馈的误检、漏检案例,针对性调整检测参数与判定阈值,持续提升

系统的实际应用效能,确保其在工业场景中保持长期稳定的检测性能。

4 结语

基于数字视网膜的工业视觉检测机电系统通过融合仿生视觉与机电控制技术,有效突破了传统检测的技术瓶颈。其科学的架构设计与高效的协同机制,在性能评估中展现出卓越的检测精度与效率,为工业生产提供了可靠的质量管控手段。随着技术的持续优化,该系统将在更多工业场景中广泛应用,推动智能制造向更高精度、更高效能的方向迈进,为制造业的转型升级注入强劲动力。

参考文献

- [1] 黄书舟.基于视觉检测的水压机电液位置系统研究[D].湖南师范大学,2020.
- [2] 王延英.基于灰色系统理论的机电一体化设备故障预测精度优化方法研究[J].数字通信世界,2025,(07):27-29.
- [3] 金晶,张彬,许国伟,等.一种无人机电力线路接续金具热缺陷巡检系统的设计[J].电子测试,2022,36(14):94-96.
- [4] 孟涵.基于 5G 物联网技术的高精度机电自动化协同控制系统研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(07):202-204.
- [5] 宜云鹏.新能源汽车机电一体化动力系统的高效协同控制策略探究[J].汽车与驾驶维修(维修版),2025,(05):24-26.
- [6] 陆源.纯电动汽车机电式制动能量回收系统协同控制策略研究[J].汽车测试报告,2025,(09):145-147.
- [7] 张闯辉,钟立聪.工业测控执行器与 PLC 协同控制在高速公路隧道机电系统中的应用[J].交通科技与管理,2024,5(21):20-22.
- [8] 张泽.机电系统集成中的智能调度与协同控制措施研究[J].机电产品开发与创新,2025,38(03):201-203.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS