

基于机器视觉和改进 PID 的 动车组行李机械臂智能码放控制研究

文 ◆ 兰州交通大学自动化与电气工程学院 姜文林 瞿莉丽

引言

伴随着高速铁路的进一步发展，动车组行李处理系统自动化和智能化需求日益紧迫。以往传统的行李码放方式是以人工操作方式为主，效率较低，同时也面临着诸多安全隐患。为了进一步提升行李处理的自动化水平和作业效率，应结合实际情况开发一种基于机器视觉和改进 PID 控制算法的动车组行李机械臂智能码放控制系统。机器视觉技术是人工智能领域中非常重要的方面，呈现出了高速度且高精度的特征，在工业自动化领域中得到了广泛应用。通过引入机器视觉技术，能够精准识别和定位行李，为机械臂的精准抓取和码放提供重要的数据支撑。基于此，本文研究了机器视觉和改进 PID 的动车组行李机械臂智能码放控制系统，以供参考。

1 研究背景和现状

1.1 研究背景

(1) 动车组行李管理的需求与挑战。随着我国高铁网络的快速发展和客流量持续增长，动

车组车厢内的行李码放效率、安全性以及空间利用率问题日益凸显。传统人工码放存在效率低、劳动强度大、易引发安全隐患的问题，如行李滑落、通道堵塞等问题。尤其在高峰期，行李数量多、尺寸差异大，亟须一种智能化的行李自动码放系统，以提高车厢秩序和改善乘客体验。(2) 机械臂技术在轨道交通中的潜力。工业机械臂已在制造业、物流仓储等领域广泛应用，但其在高铁场景中的应用仍面临特殊挑战。首先，动态环境方面，列车行驶中存在振动、光照变化、乘客移动等干扰因素。其次，复杂任务方面，行李形状多样、码放需满足稳定性和空间优化。最后，实时性要求，需在短时间内完成识别、抓取、码放全流程^[1]。(3) 技术融合趋势。一是机器视觉技术，为机械臂提供目标定位、姿态估计和环境感知能力。二是智能控制算法，传统 PID 控制难以应对非线性、时变系统，需结合改进算法，提升动态响应精度。

1.2 国内外研究现状

(1) 机器视觉在机械臂控制中的应用。第一，目标检测与定位。主流方法包括基于深度学习的 YOLO、Mask R-CNN 等算法，可实现高精度目标分割和位姿估计；轻量化模型适配嵌入式设备，提升实时性；针对遮挡、反光等复杂场景的鲁棒性优化。第二，三维视觉技术。双目视觉、结构光、ToF 传感器用于获取行李三维信息，但需解决计算量大和噪声干扰问题。国内中车集团等企业开展了车厢环境下的视觉系统研究，但公开文献较少，多聚焦于基础算法验证。(2) 改进 PID 控制在机械臂中的进展。固定参数难以适应负载变化、非线性摩擦与外部扰动，易导致超调、振荡。通过模糊规则动态调整参数，适应不确定性环境，基于模型参考或在线辨识调整参数，代表研究如模型预测控制与 PID 结合。利用遗传算法、粒子群优化进行参数自整定，提升收敛速度。部分企业已将改进 PID 用于高速高精度机械臂，但多针对结构化工业场景，高铁动态环境下的应用仍需探索。(3) 智能码放系统的集成研究。“视觉 + 力觉传感”实现“抓取—放置”柔顺控制，避免行李损坏。北京交通大学、西南交通大学等团队在高铁智能装备领域开展了机械臂相关研

【作者简介】姜文林（2004—），男，山东青岛人，本科，研究方向：机器视觉、模式识别与智能系统控制。

【通讯作者】瞿莉丽（1982—），女，甘肃兰州人，硕士，讲师，研究方向：轨道交通安全控制、优化算法设计等。

究，但针对行李码放的系统化方案仍处于实验室阶段。基于机器视觉和改进 PID 的动车组行李机械臂智能码放控制研究，是轨道交通智能化升级的重要方向。当前需突破复杂环境感知、高精度动态控制、系统集成等关键技术，并结合实际场景验证可靠性^[2]。

2 工程案例与成效

(1) 动车组行李智能码放系统的场景需求表现为高铁站行李需在有限时间内完成高密度、多规格码放，传统人工方式效率低且易出错。采用 3D 视觉引导与改进 PID 控制，机械臂根据行李尺寸动态规划码放层高和排列方式，空间利用率超 70%。具体的效果表现为日均处理量达 2 万件，码放成功率达到 99% 以上，人工干预率降低 90%。(2) 机场行李智能搬运系统。以某码垛机器人为例，其搭配双目视觉，支持多材质行李抓取，重复定位精度 $\pm 0.5\text{mm}$ ，抓取成功率 99%。某机场实测显示，系统每小时可连续处理行李，减少人工搬运导致的错分问题。(3) 电商物流混码单元。库卡机械臂结合梅卡曼德 3D 相机，实现多 SKU 纸箱无序混码，无需人工示教，系统部署周期缩短至 1 周。连续码放 50 个随机尺寸箱子，空间利用率达 75%，超越人工码垛效率 30%。

该技术通过机器视觉的精准感知与改进 PID 的动态控制，在动车组行李码放中实现了高效、柔性化作业。实际工程案例表明，其空间利用率和稳定性显著优于传统方法。

3 机器视觉在行李码放中的应用

随着高铁动车组的普及，行李快速、安全码放成为提升运营效率的关键。传统机械臂依赖预设路径，难以适应动态环境。本案例结合机器视觉与改进 PID 控制，开发智能码放系统，以提升精度与适应性。

(1) 在图像采集与预处理期间，采用工业级 RGB-D 相机，结合抗振动支架，适应动车组环境。使用自适应直方图均衡化消除光线不均，通过滤波降低噪声。采用轻量化 YOLOv5 模型，实时检测行李位置、尺寸与类别，准确率达 98%。结合深度信息生成 3D 点云，利用 PCL 库进行平面分割，提取行李中心坐标以及姿态。基于多视角融合或时序预测，补偿遮挡区域的定位误差。(2) 以往传统 PID 的局限性表现为动车组振动导致负载突变，传统 PID 参数固定，易出现超调或响应延迟。这就需要引入模糊逻辑，加入前馈补偿，抵消机械臂关节摩擦与外部振动影响。视觉系统以 30Hz 频率输出行李位姿，通过机器人操作系统与 PID 控制器通信，延时小于 10ms。基于 RRT 算法生成无碰撞轨迹，结合动力学约束优化加速度曲线，依据行李尺寸选择吸盘或夹爪，压力传感器实时反馈确保稳定抓取。利用视觉系统实时监测码放结果，一旦偏差超过阈值，触发 PID 二次调整。

当前，模拟动车组车厢环境，随机放置 20 件不同尺寸行李，体积范围为 $20\text{cm}^3 \sim 50\text{cm}^3$ ，机械臂为 6 自由度协作型。其中，“传统 PID+ 预设路径”平均码放时间为 8s/件，定位误差 $\pm 5\text{mm}$ ，复杂场景成功率 70%，改进方案为平均码放时间控制在 5s/件，定位误差 $\pm 1.5\text{mm}$ ，复杂场景成功率 95%。

经过结果分析，改进方案在振动环境下仍保持较高精度，码放效率提升 37.5%，误抓率降至 2% 以下。该案例通过机器视觉与模糊 PID 的融合，全面提升了动车组行李码放的智能化水平。未来可探索数字孪生技术预演码放过程或引入强化学习，进一步优化控制策略^[3]。

4 改进 PID 控制在机械臂码放操作中的应用

基于机器视觉和改进 PID 的动车组行李机械臂智能码放控制技术，是一种结合图像处理技术和先进控制算法的自动化系统，可以有效提高行李码放的效率、精度和环境适应性。

(1) 技术背景与需求。一是高精度要求：机械臂需在有限空间内完成毫米级定位，通常要求控制在 $\pm 1\text{mm}$ 以内。二是抗干扰能力：需有效抑制列车运行中的振动、光照变化等干扰因素。三是高实时性约束：码放周期需控制在 3s ~ 5s 范围内，以满足高铁站的作业效率要求。

(2) 系统架构设计。智能码放控制系统通常采用分层结构设计。第一，机器视觉层关键技术。通过多视角 3D 重建技术，采用 RGB-D 相机或双目视觉设备获取行李点云数据，实时检测行李边界框；利用 ICP 算法匹配模板点云，定位误差可控制在 2mm 以内；结合 RRT 算法生成无碰撞轨迹。第二，改进 PID 控制层设计。针对传统 PID 控制的不足，系统可采用多种改进策略。一是模糊自适应 PID，通过隶属度函数在线调整 $K_p/K_i/K_d$ ，在动车场景中可适应 0kg ~ 30kg 范围内的行李重量变化。二是神经网络

PID，引入切换函数增强系统鲁棒性，应用于动车场景时可使关节耦合误差降低 40%。三是滑模变结构 PID，通过切换函数提升抗干扰能力，在振动干扰环境下将超调量控制在 3% 以内。四是分数阶 PID，支持微分积分阶次可调，能将轨迹跟踪误差减小至 $\pm 0.5\text{mm}$ 。

综上所述，通过改进 PID 与机器视觉的融合方案，首先系统动态响应性能得到显著优化。阶跃响应上升时间从 1.2s 缩短至 0.8s，超调量由 15% 降至 5% 以内。其次，定位精度与系统鲁棒性同步提升。稳态误差方面，X/Y 轴控制在 $\pm 0.3\text{mm}$ ，Z 轴控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ ，即便在 10Hz 振动干扰环境下，仍能保持定位精度。最后，系统对负载突变的适应性大幅增强。当负载由 20kg 骤增至 30kg 时，恢复时间可控制在 0.5s 内。目前，该技术方案已在国内 CR400BF 型智能动车组中试点应用，这一突破标志着我国轨道交通装备在向智能化、柔性化方向迈出了关键一步。

5 机器视觉和改进 PID 的动车组行李机械臂智能码放控制系统的整体优势

(1) 提高码放精度与效率。系统通过机器视觉技术，能够实

现对行李的精确识别和定位，避免了人工操作带来的误差。改进 PID 控制算法的应用，使得机械臂能够按照预定轨迹平稳、准确地码放行李，大幅提高了码放精度。同时，自动化操作减少了人工干预，显著提升了行李处理的效率。(2) 增强系统稳定性与可靠性。机器视觉技术能够实时监测行李的位置和状态，为机械臂提供准确的反馈信息，有助于系统快速响应外界干扰，保持码放过程的稳定性。改进 PID 控制算法具备自适应能力，能够根据机械臂的负载大小和外界环境的变化，自动调整控制参数，确保系统在各种工况下都能稳定运行^[4]。(3) 降低人力成本与安全风险。自动化码放系统的引入，减少了人工操作的需求，降低了人力成本。机械臂代替人工进行行李码放，避免了人工操作带来的安全风险，如重物搬运导致的伤害等。高效的行李码放系统能够缩短乘客等待行李处理的时间，提升用户体验，精确的码放操作能够减少行李在运输过程中的损坏风险，提高服务质量。同时，智能化、自动化的操作方式也符合现代人对便捷、高效服务的需求。

结语

该系统已经在国内部分高铁站的行李处理系统中得到应用。通过机器视觉技术，系统能够自动识别行李的大小、形状和位置，然后通过改进 PID 控制算法，引导机械臂进行精确抓取和码放。这一流程大幅缩短了行李处理的时间，提高了整体效率。传统的人工行李处理方式存在诸多安全隐患，如重物搬运导致的伤害、行李掉落等。而该系统通过自动化操作，避免了这些安全隐患，确保了行李处理过程的安全性。自动化系统的引入，使得原本需要大量人工参与的行李处理工作变得更为高效和便捷。这不仅降低了人力成本，还提高了工作的准确性和可靠性。

随着人工智能、大数据和物联网等技术的不断发展，机器视觉和改进 PID 控制算法将不断融合创新，进一步提升系统的智能化水平。例如，通过深度学习算法，系统可以实现对行李的更精细分类和识别；通过物联网技术，系统可以实现与其他设备的互联互通，提高整体运营效率。除了动车组行李处理领域，该系统还可以拓展到其他领域，如机场行李处理、物流仓储等。这些领域对行李处理的效率和准确性要求同样很高，该系统具有广阔的应用前景^[5]。

引用

- [1] 马天兵,周青,杜菲,等.基于机器视觉和改进PID的压电柔性机械臂振动控制[J].光学精密工程,2020,28(1):141-150.
- [2] 赵娟,杨慧中.机械臂运动的智能自适应模糊控制策略[J].机械设计与制造,2020(8):192-196.
- [3] 唐立伟,颜红芹.基于PSO算法的串联机械手位置跟踪模糊PID控制(英文)[J].机床与液压,2020,48(12):72-76.
- [4] 王娜.基于Simulink的机械臂PID算法优化设计与实现[J].电子设计工程,2020,28(4):158-162.
- [5] 陈丽敏,孟令新,王大镇.采用混合算法优化的并联机械臂能量消耗与误差仿真研究[J].中国工程机械学报,2018,16(2):136-141.

