

融合双级机器视觉与纠偏机构的输送线 烟箱位姿校正系统

杨建江¹, 岳帅¹, 岳延飞¹, 徐博^{2,3}, 刘博¹, 王小飞¹

- (1. 张家口卷烟厂有限责任公司, 河北 张家口 075051;
2. 河北省机电一体化中试基地有限公司, 石家庄 050081;
3. 河北省智能测控技术创新中心, 石家庄 050081)

摘要: 针对传统输送线烟箱位姿偏差导致的卡滞、碰撞及效率低下等问题, 提出一种融合双级机器视觉与纠偏机构的烟箱位姿校正系统, 并研制出一套工程化样机; 烟箱在输送线上传输时, 该系统一级视觉单元实时检测其尺寸规格、位置及姿态等信息, PLC 据此驱动气动推杆完成位姿粗调; 二级视觉单元联合光电传感器, 精准感知烟箱位置与期望姿态偏差, 触发由顶升气缸与旋转托盘协同执行的细微补偿机制, 精细补偿烟箱与期望角度的小幅偏差; 算例分析与实测结果表明: 该系统可实现多种规格、角度烟箱的位姿校正, 校正精度达 97.6%, 输送成功率达到 100%; 在适应性、实时性及校正精度方面表现突出, 显著优于现有常用技术, 为自动化输送线的稳定运行提供了高效解决方案。

关键词: 烟箱位姿校正; 双级机器视觉; 双级纠偏机构; 输送线

Pose Correction System of Conveyor Line Smoke Box Based on Two-Stage Machine Vision and Deviation Correction Mechanism

YANG Jianjiang¹, YUE Shuai¹, YUE Yanfei¹, XU Bo^{2,3}, LIU Bo¹, WANG Xiaofei¹

- (1. Zhangjiakou Cigarette Factory Co., Ltd., Zhangjiakou 075051, China;
2. Hebei Mechatronics Intermediate Pilot Production Base, Shijiazhuang 050081, China;
3. Hebei Intelligent Measurement and Control Technology Innovation Center, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Aiming at the problems of jamming, collision and low efficiency caused by the pose deviation of the traditional conveyor line smoke box, a smoke box pose correction system integrating two-stage machine vision and correction mechanism is proposed, and an engineering prototype is developed. When the smoke box is transmitted on the conveyor line, the first-level visual unit of the system detects its size, position and attitude in real time, and the PLC drives the pneumatic push rod to complete the coarse adjustment of the position and attitude. The secondary visual unit combines the photoelectric sensor to accurately sense the deviation between the position of the smoke box and the expected attitude, and triggers the fine compensation mechanism coordinated by the lifting cylinder and the rotating tray to finely compensate the small deviation between the smoke box and the expected angle. The results of example analysis and measurement show that the system can realize the pose correction of various specifications and angles of smoke boxes, the correction accuracy is 97.6%, and the success rate of transportation is 100%. It has outstanding performance in adaptability, real-time performance and correction accuracy, which is significantly better than the existing common technologies, and provides an efficient solution for the stable operation of automated conveyor lines.

Keywords: box pose correction; two-stage machine vision; two-stage correction mechanism; conveyor line

收稿日期: 2025-06-24; 修回日期: 2025-08-25。

基金项目: 河北中烟工业有限责任公司科技计划项目(ZY012024A009); 石家庄市中试熟化平台项目(234790134A)。

作者简介: 杨建江(1981-), 男, 大学本科, 工程师。

引用格式: 杨建江, 岳帅, 岳延飞, 等. 融合双级机器视觉与纠偏机构的输送线烟箱位姿校正系统[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(1): 181-187.

0 引言

工业 4.0 的推进显著提升了输送系统的自动化与智能化水平。输送系统作为提升工业产能与生产效率的核心装备,其运行效能直接影响企业的综合效益^[1-2]。烟箱输送过程中受放置偏差、输送带动态偏移及摩擦异变等复杂因素影响,易产生倾斜、旋转等多维位姿偏差,从而引发卡滞碰撞、打包不便及后续工序失序等连锁问题,严重制约输送线的安全与效率^[3-5]。因此,研究高精度、高效能的烟箱位姿校正技术,对保障输送线安全高效稳定运行、提升作业可控性及经济效益具有重要的现实意义^[6-7]。

在复杂的工业环境中,传统箱体位姿校正方法主要依赖机械限位或人工干预,存在适应性差、效率低等问题^[8]。文献 [9] 针对烟箱在链式输送机转向过渡辊道时易跑偏卡死或移位引发停机的问题,在过渡辊道两侧加装对向导向轮限位装置,减少了烟箱错位次数。文献 [10] 提出了在传统包装机前端加装用于限位的翻盒机,使得药品卡在翻转机构前端的次数减少。然而,机械限位装置通常仅适配固定规格箱体,可移植性差,难以满足复杂工况下的多规格箱体校正需求,使得其推广受到较大限制^[11]。

随着人工智能技术的快速发展,融合视觉算法及高效执行机构的智能化箱体位姿校正技术成为解决此类问题的关键^[12]。文献 [13] 基于机器视觉技术提出了一种带式输送机跑偏监测预警方法,可识别出带式输送机跑偏类别、方向以及程度,但预警后仍需依赖人工调校。文献 [14] 基于可编程逻辑控制器 (PLC, programmable logic controller) 实现对辊轴的控制,实现鸡粪传送带偏离后的自动纠正。然而,影响货物位姿的因素复杂多样,上述研究仅针对单一的输送机跑偏因素,难以从更高层次综合分析。文献 [15-16] 使用 OpenCV 进行图像处理,直接获得箱体的位置和角度,使系统闭环,但 OpenCV 图像处理技术极易受到光照影响,不适应复杂的输送环境。因此,文献 [17] 基于视觉技术提出了一种单级输送平台货箱姿态校正系统,基于深度学习模型 Mask R-CNN 识别定位及分割货箱,设计全向轮式转运平台完成箱体姿态校正,但仅通过小型实验平台完成理想测试,且其单级系统的设计难以平衡输送速度与位姿校正精度,难以形成实际产品。文献 [18-19] 基于单级视觉单元与模板匹配算法设计了烟箱姿态校正系统,通过机械手在烟箱成垛后进行角度调整。该方法未实现输送过程中的实时校正,增加了额外时间成本,且模板匹配的精度受限于复杂工况。

综上所述,面对日益庞大的工业自动化输送线,现

有的校正方法主要依赖机械限位或人工干预,且常针对单一因素研究,而视觉方法通常仅被部署于单一环节,在精度、自动化水平和应用前景方面存在明显不足。为此,本文提出一种融合双级机器视觉与纠偏机构的位姿校正系统。系统通过一级视觉单元实时检测烟箱尺寸规格、位置及初始位姿特征,驱动气动推杆迅速完成烟箱位姿粗调,加快了烟箱位姿校正的速度;通过二级视觉单元联合光电传感器精准感知位姿偏差触发由顶升气缸与旋转托盘协同执行的细微补偿,确保校正精度。系统可适配多种规格烟箱,集成烟箱缺陷识别功能,从更高层次综合分析并控制双级执行机构实现烟箱的自适应位姿校正,避免了仅考虑单一因素的不完全性,并研制出一套工程化样机完成了实地测验。算例分析与实测结果表明,相较于传统方案,本系统在作业效果、稳定性及精度等方面具有显著优势,有效提升了输送系统的效率。

1 系统整体机械结构设计

为构建可靠的基础架构支撑,本团队基于真实输送线环境,设计了系统的模块化机械结构,以解决传统输送系统中存在的位姿校正效率低与机械损伤风险高的技术难题。

如图 1 所示,系统机械结构采用可拼装、拆卸的模块化设计,以降低安装难度与成本。烟箱依次经由供给单元、位姿初整理单元及位姿校正单元完成传输与校正。

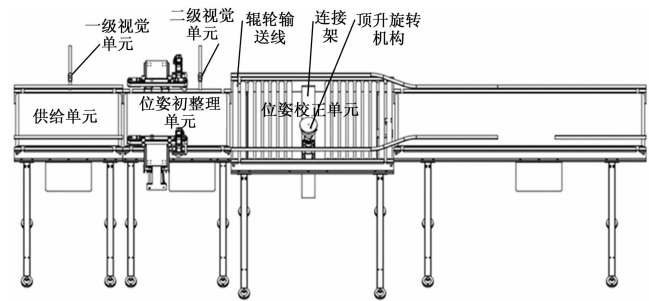


图 1 系统机械结构设计图

在供给单元正上方部署初级视觉单元,利用特征提取算法实时识别烟箱的几何参数及初始位姿,并计算其与期望角度的偏差值。

如图 2、图 3 所示,位姿初整理单元采用对称式可调结构,由双侧输送面间距调节机构构成。该机构通过直线导轨导向系统与气动执行机构联动,其关键调节部分采用双竖直固定板对称布局,并经由倒 T 型连接板集成气动驱动系统。U 型槽与平面连接板构成复合承载结构,辅以加强筋以提升整体刚度。该单元根据初级视觉单元识别的烟箱信息动态调整对向输送面间距,在

避免机械干涉的同时确保粗调精度, 其顶部设置的二级视觉单元通过位姿算法对粗调效果进行二次检测与分析, 为后续位姿精调单元提供可靠的数据支撑。二级视觉单元集成有缺陷报警功能, 当检测到烟箱存在破损及污渍产生无法出厂的缺陷时, 触发报警并引导人工处置。

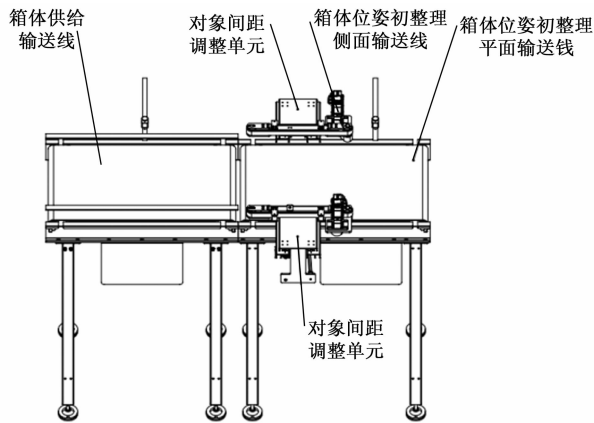


图 2 位姿初整理单元机械结构俯视图

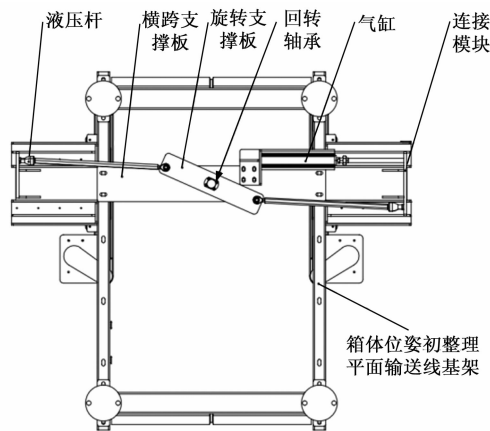


图 3 位姿初整理单元机械结构侧视图

如图 4 所示, 位姿校正单元设计有辊轮输送线与顶升旋转机构。旋转机构上端面中心安装的光电开关, 用于实时检测输送线上烟箱的通过状态。鉴于位姿初整理单元仅依赖初级视觉单元感知位置, 可能存在视觉感知与执行机构动作间的时序偏差, 位姿校正单元的光电开关设计则确保了动态移动烟箱位置的实时精准追踪。当识别到位姿异常的烟箱时, 顶升气缸即刻响应, 驱动旋转平台垂直抬升烟箱并进行旋转; 若传输带上存在其他烟箱, 则减速等待。随后, 系统依据二级视觉单元提供的烟箱信息执行精细旋转校正。校正完成后复位下降, 烟箱继续由输送线传输。

2 系统视觉算法设计及集成实现

基于所设计的机械系统, 开发两级视觉单元算法。

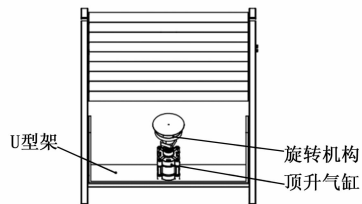


图 4 位姿校正单元机械结构设计

两级单元均采用统一的烟箱位姿识别算法, 实时计算烟箱的偏移角度、位置、尺寸、面积及轮廓等关键几何信息。二级视觉单元额外集成了 YOLOv5s 的烟箱缺陷检测模块, 当识别到破损及污渍缺陷时, 触发声光报警、冻结当前帧图像并标记异常区域, 引导人工复检。系统整体算法处理流程如图 5 所示。

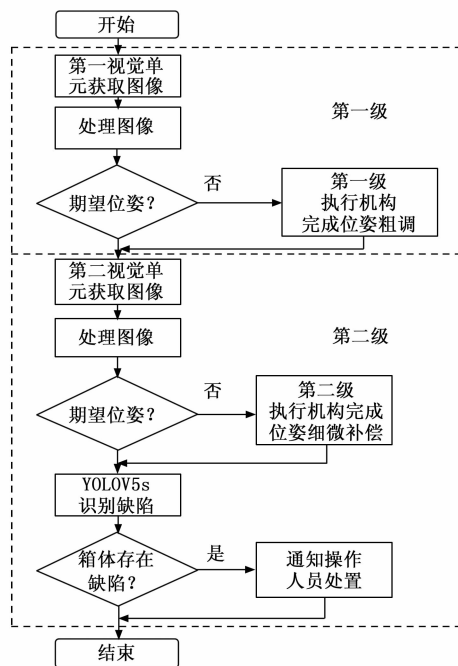


图 5 系统整体算法流程图

2.1 图像处理设计

由图 6 可知, 各个视觉单元获取到有效图像后, 进行处理图像步骤。在此步骤中, 为提升图像的质量及处理分析效果, 依次将图像进行烟箱分割、灰度化、高斯滤波、轮廓识别、解姿操作, 算法流程如图 6 所示。

为提升视觉模型与执行机构的实时协同能力, 如图 7 所示, 设计采用敏感区域方法。图中黑色区域为背景; 粗线条为区域中心线; 细线条为对称分布于中心线两侧的区域边沿线; Count 为已检测烟箱的数量; ROI 为原图像截取的有效区域, 目的是割除无关背景干扰; Box_Area 为当前烟箱的像素点数量; Position 为当前烟箱的中心点坐标; Offset_Angle 为当前烟箱的偏移角度。

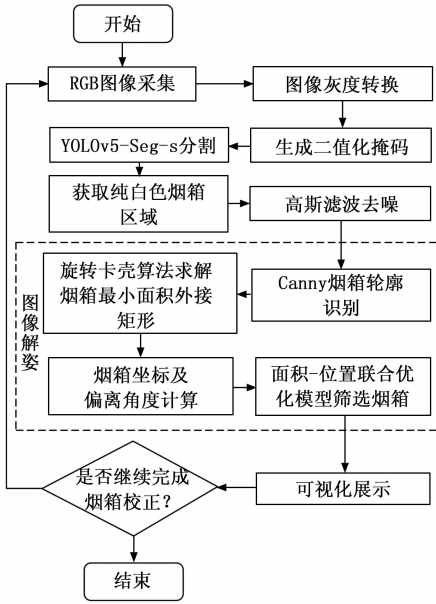


图 6 图像处理算法流程图



图 7 敏感区域设定

敏感区域具体工作原理为：当烟箱的中心点坐标通过此有效区域时，通过后续设计的步骤保存烟箱的信息，当 PLC 发出信息允许传输信号时，将信息即刻发送至 PLC，进而执行机构实现烟箱的位姿校正。

敏感区域 Ω_d 的定义如式 (1) 所示：

$$\Omega_d = \{(x, y) \mid L_d - \delta \leq y \leq L_d + \delta\} \quad (1)$$

式中， x 、 y 分别为烟箱的中心点横纵坐标， L_d 是中心线， δ 是边沿线与中心线的距离。

2.1.1 图像分割与掩码处理

传统图像处理方法易受外界环境变化干扰。为提升烟箱分割的准确性、速度及后续图像处理精度，本系统引入深度学习模型 YOLOv5-Seg-s，用于烟箱的背景识别、分割及掩码生成。

考虑到烟箱在输送线传输时移动较快，每秒需处理的数据信息较为庞大，如式 (2) 所示，为降低计算复杂度并保留关键形状信息，将 RGB 图像转换为灰度空间：

$$G(x, y) = \alpha R(x, y) + \beta G(x, y) + \gamma B(x, y) \quad (2)$$

式中， α, β, γ 是像素点 R, G, B 分量的权重， x, y 分别是像素点的 x 坐标、 y 坐标。

模型基于灰度图像完成烟箱分割后，执行掩码处理：创建与原图像尺寸一致的纯黑色背景，并将烟箱区域置为纯白色，生成二值化掩码，以简化后续图像处理流程。图 8 展示了用于训练模型的数据集概览，该数据集基于现场采集图像并由人工精确标注，包含训练集图像 250 张、验证集图像 30 张。

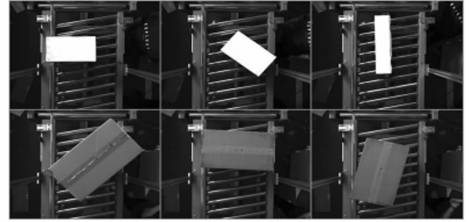


图 8 数据集概览

系统运行过程中，YOLOv5-Seg-s 模型实时分割输送线上的烟箱，在此基础上，经掩码处理后，输出如图 9 所示的烟箱分割效果。

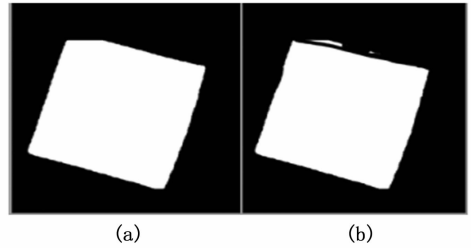


图 9 烟箱分割效果

2.1.2 图像解姿

完成掩码处理后，为获取到可靠的校正数据支撑，进行图像解姿操作。针对工业现场复杂工况，本系统构建多种算法协同的抗干扰机制，概述如下：

- 1) 光照不均场景通过灰度空间转换保留关键形状特征；
- 2) 表面反光噪斑问采用高斯滤波抑制高频噪声，并基于面积-位置联合优化模型过滤无效轮廓；
- 3) 烟箱部分遮挡工况通过旋转卡壳算法求解最小外接矩形保证几何参数鲁棒性；
- 4) 输送线杂物干扰利用面积阈值分割，排除小纸片干扰；
- 5) 自适应最小烟箱尺寸与敏感区域优先原则排除碎片影响。各级策略在预处理、特征提取、决策层形成闭环，显著提升复杂环境下的泛化能力。

烟箱上的包装条、胶带等材质反光明显，图像分割后可能会产生如图 9 (b) 中的噪斑。如式 (3) 所示，为消除反光光斑、表面纹理等噪声干扰，将各个像素点

采用同性高斯滤波函数 G_σ 滤波对图像进行加权平均的平滑处理, 有效抑制噪声, 其核心特征是在各个方向上具有相同的平滑强度:

$$G_\sigma(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

式中, σ 是标准差, σ 越小高斯核窄而高, 权重集中在中心点附近, 平滑效果越弱。

图像预处理完成后, 如式 (4) 所示, 通过 Canny 算法, 设置其高低阈值 low、high, 获取所有闭合轮廓, 边缘通常表现为图像亮度的剧烈变化 (即梯度大的地方)。这一步找出图像中每个像素点亮度变化的速度 (梯度幅值) 和变化最剧烈的方向 (梯度方向)。

$$C_{\text{Canny}} = \{c_1, c_2, \dots, c_n\} \quad (4)$$

式中, c 是经合理设置阈值后, 通过 Canny 算法获取到的图像中的所有闭合轮廓。

输送线可能出现杂物、烟箱包装碎片、多个烟箱距离过近传送的情况, 所识别到的轮廓较多。为筛选出有效轮廓, 如式 (5) 所示, 采用旋转卡壳算法求解其最小面积外接矩形, 旋转扫描过程为初始化一对平行线 (卡尺), 使其与凸多边形 (即已识别出的烟箱轮廓) 的一条边重合。按固定方向旋转这对平行线, 同时记录与平行线接触的顶点。最多旋转角度为 180° 即可覆盖所有可能的对踵点对, 获取最小面积外接矩形:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_c \\ y - y_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, x' 、 y' 分别是最小面积外接矩形的宽和高, θ 为矩形的旋转角度, 旋转该角度后可使得矩形的长边和坐标轴对齐, x_c 、 y_c 分别是烟箱中心点的 x 及 y 坐标。

如式 (6) 所示, 显然据轮廓求解出的最小面积外接矩形面积可表示如下:

$$A = x' \cdot y' \quad (6)$$

为进一步地过滤噪斑的影响, 建立面积-位置联合优化模型以筛选烟箱, 依据最小烟箱面积设定面积阈值 A_t 。如式 (7) 所示, 当轮廓的面积大于设定阈值且中心点坐标最接近于敏感区域时, 认定其为即将检测的烟箱轮廓 C_{target} , 进行后续处理。

$$C_{\text{target}} = A > A_t \text{ and } \underset{c_i}{\text{argmin}} |y_c - (L_d + \delta)| \quad (7)$$

如式 (8) 所示, 求解出烟箱最小面积外接矩形后, 以矩形的左上角顶点为坐标原点, 通过外接矩形顶点构成的直线计算 C_{target} 烟箱相对于图像左侧边的角度偏差 θ_{current} 。

$$\theta_{\text{current}} = \arctan(l_k) \quad (8)$$

式中, l_k 为烟箱左侧边构成直线的斜率。

如式 (9) 所示, 当烟箱为即将检测的烟箱轮廓 C_{target} 且中心坐标满足 $(x_c, y_c) \in \Omega_d$ 时, 执行数据保存操

作, 并将检测到的最新烟箱数据覆盖历史数据, 等待 PLC 发送请求时发出。

$$\theta_{\text{last}} \leftarrow \theta_{\text{current}} \quad (9)$$

式中, θ_{last} 是检测到的上一个烟箱信息偏离角度, θ_{current} 是检测到的本次烟箱偏离角度。

2.2 PLC 控制动作与通信机制设计

当烟箱中心点坐标进入预设有效区域时, 触发信息记录功能。待该烟箱抵达前方光电开关检测位, PLC 随即生成信息允许传输指令, 并通过通信接口将记录的数据传输至执行单元。

基于接收到的烟箱位姿数据, PLC 驱动执行机构进行位姿校正作业。该过程采用空间坐标检测与光电开关信号的双重触发机制, 确保位姿校正动作在精确的空间位置和时序下启动。

PLC 执行位姿校正作业的具体流程如下。

1) 异常烟箱检测与减速控制: 检测到位姿异常的烟箱后, PLC 首先控制位姿初整理单元传送带减速, 使目标烟箱在该传送带上减速至停止。

2) 下游传送带排空: 与此同时, 位于目标烟箱前方的位姿校正单元传送带继续运行预设时长。该单元的光电传感器同步检测其传送带上是否存在其他烟箱。若检测到烟箱存在, 传送带将持续运行, 直至将位姿校正单元传送带上的烟箱全部排空。

3) 协同输送与位姿校正: 待位姿校正单元传送带确认排空后, PLC 同步启动位姿初整理单元与位姿校正单元传送带, 将目标烟箱平稳运送至位姿校正单元的旋转平台上方。随后, PLC 驱动旋转气缸, 带动旋转托盘精确旋转预设的偏移角度, 完成烟箱的位姿校正作业。

3 算例分析与车间实测

为验证所提系统的有效性和优越性, 本节针对烟箱位姿校正过程, 分别开展了仿真分析与车间实测试验。通过在典型输送线车间部署团队自主研发的工程化样机, 采集实际工况数据完成动态测试, 评估系统在复杂工业环境中的实时校正能力与运行稳定性。同时, 在相同测试条件下与现有技术进行对比实验, 定量分析所提方案在校正精度、校正时间及输送成功率等关键指标上的性能。

3.1 实验参数与评价指标

测试系统的软件环境为 Windows 10 操作系统, 硬件配置为 Intel (R) Core (TM) i7-4900HX 处理器、16 GB 内存。系统算法基于 OpenCV 与 PyTorch 深度学习框架实现, YOLO 模型在 GPU 模式下训练。经参数调优, 系统关键参数设置如表 1 所示。

表 1 实验参数设置

模型/算法	参数	数值
YOLOv5-Seg-s	epochs	100
	batch-size	16
	learning rate	0.01
	Mosaic	1.0
	Weight-decay	0.000 4
	Img size	640×640
图像解姿	L_d	300
	δ	30
	α, β, γ	0.33
	Canny(low/high)	70/255
	A_i	80 000

评价指标选取易于量化的校正精度 r 、校正时间 T 、输送成功率 v ，以定量分析系统性能。各指标计算方法分别如下：

如式 (10) 所示，校正精度 r 表示如下：

$$r = \left| \frac{\theta - \hat{\theta}}{\hat{\theta}} \right| \times 100\% \quad (10)$$

式中， θ 是烟箱偏离角度， $\hat{\theta}$ 是期望的烟箱角度。

如式 (11) 所示，校正时间 T 可表示为：

$$T = t_e - t_s \quad (11)$$

式中， t_e 是烟箱离开输送线的时刻， t_s 是烟箱进入输送线的时刻。

如式 (12) 所示，输送成功即表示烟箱未在输送线卡滞，输送成功率 v 可表示为：

$$v = \left(\frac{s - s'}{s} \right) \times 100\% \quad (12)$$

式中， s 是烟箱的总个数， s' 是输送失败的烟箱个数。

3.2 视觉仿真实验实地测验及对比测试

根据实际作业需求，设定烟箱期望角度为 90° （即长边向前，短边平行输送带），且该需求下校正难度最大。为保证安全，首先进行视觉仿真实验以验证算法有效性。如图 10 所示，仿真系统根据烟箱角度差异，采用不同灰度框标识烟箱（角度较小时为亮灰色，较大时为暗灰色），并在烟箱中心点实时绘制坐标系与角度信息，在图像中间位置实时显示烟箱面积及中心点坐标信息。图 10 (b) 同时绘制出了烟箱破损缺陷信息。

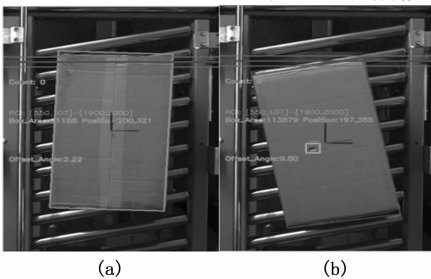


图 10 视觉仿真效果图

完成仿真验证后，将样机部署于烟厂生产线进行实测。图 11 展示了样机作业实景，可见旋转机构正将烟箱校正至长边向前的姿态。样机传输通道宽度为 52 cm，略大于最大烟箱尺寸，运行速度为 1 m/s。测试使用产线上三类常见的烟箱，规格及重量分别为：46.2 cm × 25.4 cm × 58.2 cm，14.8 kg；49.0 cm × 28.5 cm × 30.5 cm，9.95 kg；50.0 cm × 27.0 cm × 29.4 cm，11.12 kg。

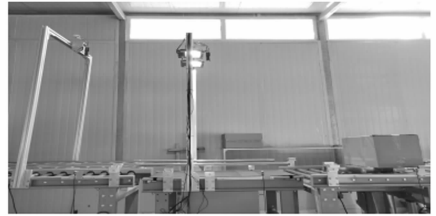


图 11 样机车间实测作业图

实测时，在实际输送场景中进行消融实验及与现有技术对比，基本步骤是通过逐步增添完善技术环节，完成样机有效性验证：依次将实验条件设置为未使用校正方法、仅使用本文提出的第一级校正方法、仅使用本文提出的第二级校正方法、未加 YOLOv5-Seg-s 分割网络、以及添加 YOLOv5-Seg-s 并使用本文提出的双级校正方法，在每个实验条件下分别使用 1 000 个随机摆放的烟箱，经过样机传输后，计算得出各个评价指标的结果，如表 2 所示。

表 2 消融与对比实验评价指标结果

实验条件设置	校正精度 / %	校正时间 / s	输送成功率 / %
未使用校正	17.1	6.51	39
机械限位	73.4	7.22	70
仅使用一级	75.7	7.82	76
仅使用二级	82.0	8.92	87
未加分割网络使用双级	87.8	9.86	94
添加分割网络使用双级	97.6	9.95	100

观察表 2 可见，未使用校正方法时，校正精度和输送成功率处于最低水平，此时烟箱由工人随意摆放，难以满足产线要求。针对不同的烟箱规格，通过调整两侧护栏实现机械限位，此时相较于未使用校正方法，各指标均有了明显提升。然而，机械限位法仅适配固定的烟箱规格与期望角度，适应场景较为局限。

初级视觉+粗调的气动机构显著提升了校正精度和输送成功率，校正时间在所有校正方法中最短，但精度和成功率仍有提升空间。

二级视觉+精调的托盘机构在精度和成功率上显著优于一级方案，体现了精调机构对小幅偏差的补偿优势，但校正时间略有增加了 1.1 s。

未添加 YOLOv5-Seg-s 模型的双级系统进一步提升了性能, 但校正时间略有增加。说明双级协同有效, 但分割网络的缺失影响了位姿解算的准确性和鲁棒性。YOLOv5-Seg-s 模型包含 24 层卷积及特征金字塔结构, 相较于传统视觉算法具有更高的计算复杂度, 单帧推理耗时平均约 128 ms, 较传统形态学算法 (约 12 ms) 增加 467%; 且模型推断需占用 GPU 显存 1.8 GB, 引发 CPU-GPU 数据交换与通讯延迟。添加 YOLOv5-Seg-s 模型的完整系统达到最佳性能, 校正精度 97.6%, 输送成功率 100%。虽然校正时间较未使用校正时增加约 3.54 s, 但相较于其带来的校正精度与输送成功率的大幅提升, 该时间增量是可接受的, 且满足产线实时性要求。

未来研究可结合具体应用场景, 通过增加投入以增强系统算力与硬件资源, 进一步提升系统效能。例如, 采用高性能、更快响应的伺服电机、高性能 GPU, 并对 YOLOv5-Seg-s 模型进行针对性的轻量化设计优化, 以期全面提升系统的综合性能。

综上所述, 通过逐步引入本文提出的关键技术模块的消融实验 (初级机构、二级机构、分割网络、双级协同), 可表明深度学习技术与传统视觉算法的高效结合与双级系统的设计有效提升了输送系统的校正精度与输送成功率。

4 结束语

针对传统成品输送线中烟箱位姿偏差导致的卡滞、碰撞、打包效率低下等问题, 本文提出了一种融合双级机器视觉与纠偏机构的位姿自适应校正系统。该系统通过深度学习 YOLOv5-Seg-s 分割模型与传统视觉算法的高效结合, 以及对双级视觉感知与执行机构的创新设计, 实现了不同规格、任意角度烟箱的高精度位姿校正。实验验证表明: 在复杂工业环境下, 该系统能精准捕捉关键图像特征, 校正精度达 97.6%, 输送成功率达 100%, 在适应性、实时性及鲁棒性方面优势显著。其模块化机械结构、简约设计、较低加装成本及算法的强适应性, 使其在现代化自动化生产线中具有显著的工程实用价值与经济可行性。

参考文献:

- [1] 刘伟华, 王思宇, 周志成. 工业 4.0 技术对物流业制造业融合的影响路径研究——基于国家发改委征集典型案例集的研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2025, 45 (7): 2245-2263.
- [2] JAVAID M, HALEEM A, SUMAN R. Digital twin applications toward industry 4.0: A review [J]. Cognitive Robotics, 2023, 3: 71-92.
- [3] JAN Z, AHAMED F, MAYER W, et al. Artificial in-

telligence for industry 4.0: Systematic review of applications, challenges, and opportunities [J]. Expert Systems with Applications, 2023, 216: 119456.

- [4] ZHANG M, SHI H, ZHANG Y, et al. Deep learning-based damage detection of mining conveyor belt [J]. Measurement, 2021, 175: 109130.
- [5] 孙贵政, 杨建国, 王庆霞. 基于 PLC 控制的负极片生产线自动输送系统的设计 [J]. 机械设计与制造, 2012, (3): 39-41.
- [6] 葛永杰, 王丽丹, 陈定喜, 等. 基于深度学习的工业视觉烟箱体字符识别与判断 [J]. 计算机工程, 2022, 48 (1): 296-304.
- [7] 周沐霖. 基于合作目标的高速视觉位姿测量技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.
- [8] 王赵强, 王 飞. 传送带跑偏调正方法研究现状 [J]. 山西焦煤科技, 2018, 42 (10): 44-47.
- [9] 曹 蓓, 范猛士, 徐剑峰, 等. 过渡辊道输送机烟箱纠偏装置设计与应用 [J]. 装备制造技术, 2022, (12): 117-119.
- [10] 赵锡平. 浅析传统三维包装机姿态校正功能的改进 [J]. 机电信息, 2016 (9): 47-48.
- [11] 张炎顺, 罗相文. 基于自锁条件在机械设计过程中限位应用研究 [J]. 新疆钢铁, 2025 (1): 51-53.
- [12] 赵光辉, 赵 鹏, 胡金良. 语义分割的传送带跑偏视频检测算法 [J]. 中国安全科学学报, 2023, 33 (s1): 81-84.
- [13] 秦亚敏, 张 雷, 赵东哲, 等. 基于机器视觉的带式输送机跑偏监测预警方法 [J]. 煤矿机械, 2023, 44 (5): 165-167.
- [14] 宋珍珍, 宋景慧. 鸡舍运粪传送系统自动纠偏设计 [J]. 黄河科技学院学报, 2022, 24 (8): 75-79.
- [15] BANGAL R, NALAWADE S, DUSANE C. Design and control of omnidirectional conveyor model using image processing [C] //2023 Somaiya International Conference on Technology and Information Management (SICTIM), IEEE, 2023: 44-49.
- [16] ANAND G, KUMAWAT A K. Object detection and position tracking in real time using Raspberry Pi [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 47: 3221-3226.
- [17] LIU K, ZHANG H, ZHOU Z, et al. Computer vision based cargo boxes pose adjustment system for two-dimensional conveyor platform [J]. Scientific Reports, 2024, 14 (1): 19997.
- [18] 王静娴, 戴宇辉. 基于机器视觉的不规则烟草包装箱码垛校正系统设计 [J]. 机械设计与制造工程, 2023, 52 (9): 131-134.
- [19] 张 毅, 王彦博, 付华森, 等. 基于机器视觉的不规则烟包校对码垛系统 [J]. 烟草科技, 2019, 52 (6): 105-111.