

包装分拣过程视觉跟踪系统设计

亢院兵¹, 赵甫哲²

(1.河南经贸职业学院, 郑州 450018; 2.华中师范大学, 武汉 430079)

摘要: **目的** 为提高包装生产线的分拣精度, 以 Delta 机器人为研究对象, 设计一种视觉跟踪系统。**方法** 详细介绍包装生产线分拣系统的结构, 包括机器人模块、控制模块、视觉模块和传送带模块等。提出一种平移标定算法, 可简化整个标定过程, 既可以提高准确性, 又可以降低标定用时。该算法可以较好地解决空间限制对跟踪系统的影响。论述一种图像处理方法, 通过连通区域的面积、圆度和矩形度等参数实现物料识别、定位和抓取。利用具体实验验证所述系统的可行性和有效性。**结果** Delta 机器人视觉跟踪系统的漏抓率小于 0.1%, 误抓率接近于 0, 精确度得到明显提高。**结论** 整个过程中机器人运行稳定, 并没有出现冲击、颤动等现象, 系统可靠性比较高, 完全能够满足包装等相关行业要求。

关键词: 机器视觉; Delta 机器人; 平移标定; 定位

中图分类号: TP241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)17-0238-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.17.032

Design of Visual Tracking System for Packaging and Sorting Process

KANG Yuan-bing¹, ZHAO Fu-zhe²

(1.Henan Institute of Economics and Trade, Zhengzhou 450018, China;
2.Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

ABSTRACT: In order to improve the sorting accuracy of packaging production line, a visual tracking system was designed with Delta robot as the research object. The structure of sorting system of packaging production line was introduced in detail, including robot module, control module, vision module and conveyor belt module. A translation calibration algorithm was proposed, which could simplify the whole calibration process, improve the accuracy and reduce the calibration time. The algorithm could better reduce the influences of space restriction on the tracking system. An image processing method was described, which could realize material identification, positioning and capture through the parameters such as the area, roundness and rectangle of the connected area. The feasibility and effectiveness of the system were verified by specific experiments. Delta robot visual tracking system has a missing capture rate of less than 0.1% and a false capture rate close to 0, which significantly improves the accuracy. In the whole process, the robot runs stably without any impact or vibration, and the system has high reliability, which can fully meet the requirements of packaging and other related industries.

KEY WORDS: machine vision; Delta robot; translation calibration; positioning

在自动化包装生产线中, 分拣过程可实现不同物料分拣和次品剔除, 所以分拣过程十分重要。目前,

包装分拣模块普遍使用各种各样的机械手臂, 例如: 串联机械臂、并联机械臂等, 其中 Delta 机器人的使

收稿日期: 2020-12-16

基金项目: 河南省科学技术厅科技成果鉴定项目 (2015338)

作者简介: 亢院兵 (1979—), 男, 硕士, 河南经贸职业学院讲师, 主要研究方向为计算机控制工程。

用比较广泛。Delta 机器人是一种轻载、高速并联机器人，其一般具有 3 个自由度，包含动静 2 个平台。底座和动平台多为三角形，动静平台之间通过摆动杆进行连接，因此整机结构十分紧凑^[1-3]。动力装置平均分布在静平台，稳定性高、动态性能好、反复定位准确。目前，Delta 机器人在动态抓取领域的应用比较广泛。另外，机器视觉技术的引入使得 Delta 机器人的工作方式发生了根本性变化^[4-5]。在常规包装分拣流水线中，机器人的运动轨迹大多固定不变，往往通过示教方式完成抓取。基于机器视觉的新型分拣流水线，Delta 机器人可利用视觉系统获取工件相关信息，例如：形状、位置、尺寸等，结合缺陷检测系统可自动完成识别、抓取等操作，可大大提高分拣效率^[6-9]。在机器人与机器视觉的组合过程中，面临的关键性问题包括机器人的手眼标定、机械臂运动误差控制等^[10-13]。郝大孝等^[14]为提高 Delta 机器人动态抓取的精度与速度，提出了一种基于欧姆龙 NJ 控制器的 Delta 机器人控制系统，通过一体化设计实现了机器视觉与机器人动态抓取的完美结合，但是其算法执行过程比较复杂，不利于应用和推广。陈永明等^[15]针对 Delta 机器人视觉控制系统中机器人坐标和相机坐标空间不重合的问题，提出了一种 Delta 机器人平移标定与动态补偿算法，提高了机器人抓取的准确度和稳定性。算法参数小、操作简单，但是图像处理算法涉及较小，抓取精度需要进一步提高。蔡菲等^[16]以并联 DELTA 机械手作为研究对象，提出一种基于视觉图像处理的机械手智能分拣系统，通过视觉系统对分拣物体图像的采集，并通过运动轨迹分析，进而完成对物体位置的判断，然后通过动态抓取算法对物体进行抓取，以完成对传送带中物体的抓取和释放操作。控制系统比较复杂，采用 PC 机和 PLC 作为主要控制器，成本较高，不利于二次开发。

针对当前研究所存在的问题，文中设计一种 Delta 机器人视觉跟踪系统。设计一种改进的平移标

定算法，可简化动态抓取算法执行过程；采用常见图像处理算法进一步提高 Delta 机器人动态抓取精度；工控机和运动控制卡的组合既可以降低成本又利于二次开发；利用实验验证所述系统的可行性和有效性。

1 包装分拣系统简介

包装分拣系统总体框图见图 1，主要包括机器人模块、控制模块、视觉模块和传送带模块等。其中视觉模块选用海康威视 MV-CA013 系列工业相机，该相机像素为 130 万，支持最大帧率为 90 帧/s；所用镜头型号为视清 MFA230 系列；光源模块选用康视达光源及其控制器。

所述视觉模块安装在传送带正上方，可将物料实时图像传送至控制系统。控制系统会根据相关算法计算物料坐标，根据计算结果控制末端执行器运动并完成相应抓取、分拣工作。

传送带模块可实现待抓取物料运输，传送带宽度为该系统采用同步带传送待抓取物料，传送带宽度为 150 mm，长度为 1.5 m。传送带模块由调速电机直接驱动，模块配有编码器用于反馈传送带的运转速度和方向。文中选定待分拣物料形状为不同形状的立方体。

详细地讲，控制模块包括工控机，具体型号为 IPC-610H；运动控制卡，具体型号为固高 GTS-400 系列；伺服驱动器，具体型号为台达 ASD-B2-0421 系列；伺服电机，具体型号为 ECMAC20604 系列。伺服电机功率为 400 W，驱动力矩可达到 1.27 N·m，额定转速可以达到 3000 r/min，设置伺服电机的分辨率 0.001°，精度完全满足要求。另外，系统选用行星减速器，具体型号为台达 PLF060-L1 系列。

编程语言为 C++，使用 Visual Studio 2010 进行开发。运动控制卡与工控机之间的通信方式为 PCI 总线。

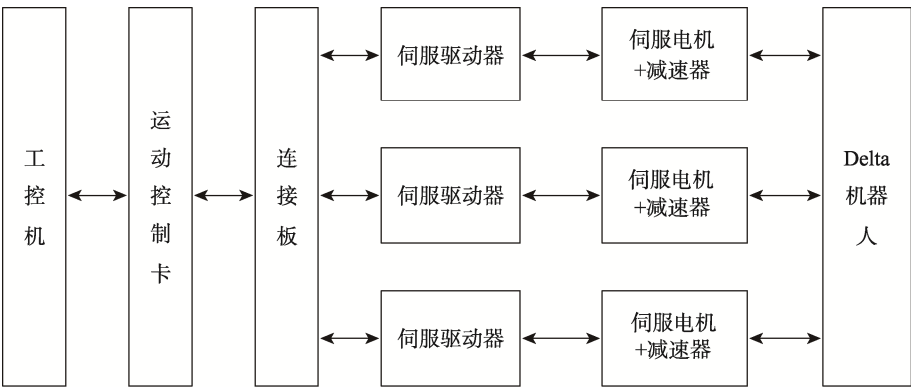


图 1 包装分拣系统总体框

Fig.1 General framework of packaging and sorting system

2 平移标定算法

定义相机坐标系下物料坐标为 (x, y) ，机器人坐标系下物料坐标为 (x', y') ，工作过程中需要进行坐标转换，对应转换公式可表示为：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \mathbf{M} \quad (1)$$

式中： $\mathbf{R}$ 为旋转矩阵； $\mathbf{M}$ 为平移矩阵。从式 (1) 可以看出，坐标转换过程本质上就是旋转平移变换过程。如果 $\mathbf{R}$ 用 $\begin{bmatrix} a & b \\ a' & b' \end{bmatrix}$ 表示， $\mathbf{M}$ 用 $\begin{bmatrix} c \\ c' \end{bmatrix}$ 表示，那么式

(1) 可写成以下形式：

$$\begin{cases} x' = ax + by + c \\ y' = a'x + b'y + c' \end{cases} \quad (2)$$

如上所述，平移标定过程就是确定旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 和平移矩阵 $\mathbf{M}$ 。为解决此问题，可定义相机坐标系下 3 个点的坐标为 (x_0, y_0) ， (x_1, y_1) ， (x_2, y_2) ，与其对应的机器人坐标系下的点的坐标为 (x'_0, y'_0) ， (x'_1, y'_1) ， (x'_2, y'_2) 。将上述各点代入式 (2)，那么则有：

$$\begin{bmatrix} x_0 & y_0 & 1 \\ x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_0 \\ x'_1 \\ x'_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_0 & y_0 & 1 \\ x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a' \\ b' \\ c' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y'_0 \\ y'_1 \\ y'_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

相机坐标系下点的坐标可直接从图像上读取而且坐标值不变，即可以较方便地确定 (x_0, y_0) ， (x_1, y_1) ， (x_2, y_2) 。机器人坐标系下点的坐标需要按照下述方式确定。如图 2 所示，视觉识别区域坐标系为 $X_c - Y_c$ ，机器人工作区域坐标系为 $X_d - Y_d$ 。如上所述，根据 6 个坐标就可以确定旋转矩阵和平移矩阵，进而实现坐标系 $X_c - Y_c$ 和 $X_d - Y_d$ 之间标定。实际运动效果可描述为：当工件运动到 (x_0, y_0) 时，机

械臂接收到指令需要运动到 (x'_0, y'_0) 处，此过程需要确定延时时间 t ，即：当工件在 (x_0, y_0) 位置时，机械臂经过一定延时，待工件运动到 (x'_0, y'_0) 时，机械臂恰好抓取。延时时间 t 可通过试校法确定，需要考虑机械臂运动速度和运动轨迹等因素。

3 动态分拣与跟踪目标的图像处理

所采集图像的清晰程度以及图像处理结果将直接影响定位、抓取精度，因此需要对所采集图像进行图像处理。首先，对图像进行均值滤波，相关表达式可描述为：

$$g(x, y) = \frac{1}{9} \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 f(x+i, y+j) \quad (5)$$

式中： $g(x, y)$ 为目标图像处理结果； $f(x, y)$ 为目标图像。

经滤波处理的图像可以进行二值化处理，处理结果见图 3。

文中所使用工业相机的光轴与待分拣物料相垂直，那么抓取目标的连通区域可使用面积、圆度和矩形度等参数进行识别。连通区域面积计算公式可表示为：

$$A_i = \sum_{k=1}^N (i_{ek} - i_{sk} + 1) \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (6)$$

式中： i 为目标图像内部第 i 个连通区域； N 为连通区域内部游程数； i_{ek} 为第 k 个游程的结束序号； i_{sk} 为 k 个游程的开始序号。

圆形度可用于表示连通区域和标准圆的相似程度。圆形度越接近 1，表明该连通区域越接近圆形。圆形度公式可表述为：

$$\phi_i = L_i / \sqrt{4\pi A_i} \quad (7)$$

式中： A_i 为连通区域面积； L_i 为连通区域周长，其计算方法可参考边界搜索算法通过计算边界图像像素总长度得到。

矩形度可用连通区域面积和最小外界矩形面积

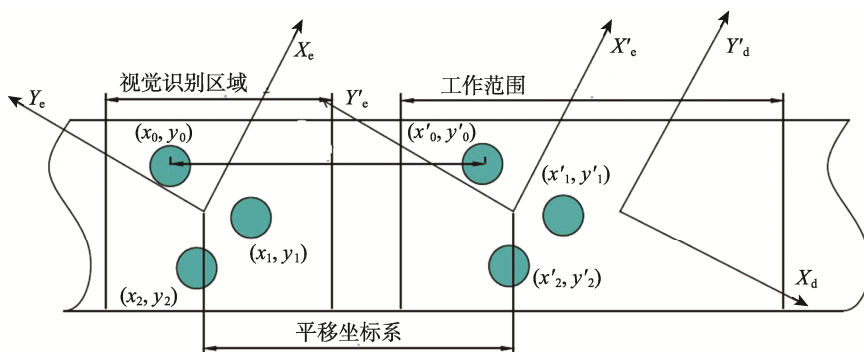


图 2 平移标定示意
Fig.2 Translation calibration diagram

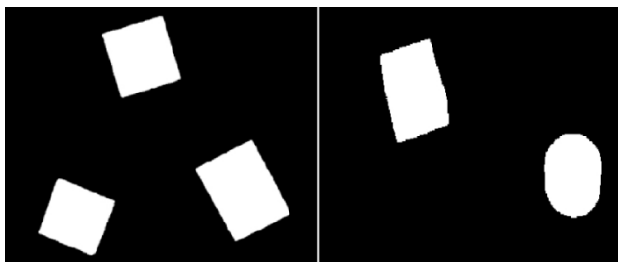


图 3 图像二值化处理结果
Fig. 3 Image binarization results

的比值确定，该值越接近 1，表明矩形度越好。矩形度可用式（8）表示。

$$\Gamma_i = A/S_{\min} \quad (8)$$

式中： $S_{\min}$ 为最小外界矩形面积。

鉴于待抓取物料的质量比较均匀，因此将物料的圆心特征视作图像的定位基准，相应计算公式可表示为：

$$\begin{cases} u = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{j=i_k}^j j}{A} \\ v = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{j=i_k}^i i}{A} \end{cases} \quad (9)$$

式中： (u, v) 为待抓取物料的圆心坐标。根据上述流程就可以得到目标物的抓取位置，经平移标定以后就可以实现物料的识别、定位和抓取。

为进一步提高 Delta 机器人的抓取精度，可考虑采用增量型 PID 控制算法。增量型 PID 控制简单、易于实现，没有积分累加，不会出现积分饱和现象。同时，该算法仅仅输出增量值，控制偏差对系统整体性能的影响有限。定义目标抓取位置和 Delta 机器人实际抓取位置之间的偏差为 $e(k)$ ，那么相应表达式为：

$$u(k) = K_p \left[e(k) - e(k-1) + \frac{T}{t_i} e(k) + \frac{t_d}{T} (e(k-2e(k-1) + e(k-2))) \right] \quad (10)$$

式中： $u(k)$ 为控制量； K_p 为比例系数； T 为采样周期； t_i 为积分时间； t_d 为微分时间。

4 实验研究

为验证所述视觉跟踪系统的可行性和有效性，文中进行相关实验研究。首先，搭建了 Delta 机器人实验系统，见图 4。

在进行实际抓取实验之前，可先进行相关模拟运算，经百万次模拟运算求取平均值可得每次运算耗时约 41.588 μ s。考虑到通信周期为 1 ms，那么所述算法完全可以满足实时性要求。

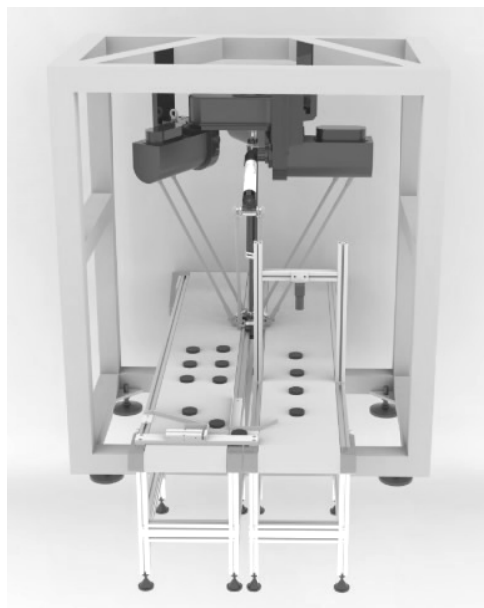


图 4 Delta 机器人实验系统
Fig.4 Delta robot experimental system

在实际抓取实验中，设定不同的传送带速度，测试视觉跟踪系统的精确性和稳定性。文中通过对比实验进行验证，即采用所述视觉跟踪系统和传统视觉跟踪系统^[16]。考虑到机器人视觉跟踪系统在图像处理、物料位置计算等环节均有可能出现一定程度的偏差，因此，设定 x 方向容差为 1 mm， y 方向容差为 1 mm，实际测试结果见表 1。

定义抓取总数为 n ，漏抓数量为 n_x ，误抓数量为 n_y ；漏抓率为 ρ_x ，误抓率为 ρ_y ，成功率为 ρ_c ，则有：

$$\rho_x = \frac{n_x}{n} \times 100\% \quad (11)$$

$$\rho_y = \frac{n_y}{n} \times 100\% \quad (12)$$

$$\rho_c = 1 - \rho_x - \rho_y \quad (13)$$

从表 1 可以看出，采用传统视觉跟踪系统，当传送带速度较小时，抓取成功率可以达到 99.77%；随着传送带速度的变大，抓取成功率下降比较明显，漏抓和误抓现象比较明显。

对比而言，采用文中所述视觉跟踪系统，即使传送带速度变大，抓取成功率变化也不明显，均接近 99.9%；系统漏抓率小于 0.1%；当传送带速度小于 120 mm/s 时，系统误抓率为 0。当传送带速度大于 120 mm/s 时，文中所述跟踪系统出现误抓的概率极低，主要原因在于物料位置较近或出现重叠，导致图像分析结果出现偏差，所以在实际生产过程中需避免物料重叠等情况出现。与传统视觉跟踪系统相比，精确度明显提高。

另外，实验过程中 Delta 机器人的最快抓取速率可以达到 100 次/min；测试时间超过 240 min，整个

表 1 实验结果
Tab.1 Experimental results

传送带速度/(mm·s ⁻¹)	文中视觉跟踪系统				传统视觉跟踪系统			
	抓取数量	漏抓	误抓	成功率/%	抓取数量	漏抓	误抓	成功率/%
30	3066	2	0	99.93	3055	7	0	99.77
60	3587	3	0	99.92	3153	20	8	99.11
120	3521	3	1	99.87	3325	33	15	98.56

过程中机器人运行稳定,并没有出现冲击、颤动等现象,说明整个系统的可靠性比较高,完全能够满足包装等相关高速、高精度要求。

5 结语

为提高包装生产线的分拣精度,在 Delta 机器人基础上设计了一种视觉跟踪系统,主要包括系统结构、图像处理算法、定位和抓取方法等。在分析平移标定算法的基础上,给出了一种图像处理算法。通过面积、圆形度和矩形度来实现目标定位和抓取。最后,通过实验验证所述跟踪系统的可行性和有效性。实验结果表明,系统准确度明显提高,机器人运行稳定,可满足相关行业对高速度、高精度抓取的要求。

参考文献:

- [1] 温秀兰,张腾飞,芮平,等.基于三维机器视觉的工业机器人定位系统设计[J].组合机床与自动化加工技术,2018(9):49—52.
WEN Xiu-lan, ZHANG Teng-fei, RUI Ping, et al. Design of Industrial Robot Positioning System Based on 3D Machine Vision[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018(9): 49—52.
- [2] 晏祖根,李明,徐克非,等.高速机器人分拣系统机器视觉技术的研究[J].包装与食品机械,2014,32(1):28—31.
YAN Zu-gen, LI Ming, XU Ke-fei, et al. High-Speed Robot Auto-Sorting System Based on Machine Vision[J]. Packaging and Food Machinery, 2014, 32(1): 28—31.
- [3] 袁飞,周文彬.基于视觉反馈的包装机械手定位控制[J].包装工程,2019,40(17):204—208.
YUAN Fei, ZHOU Wen-bin. Packaging Manipulator Positioning Control Based on Visual Feedback[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(17): 204—208.
- [4] 周炜,廖文和,田威.基于空间插值的工业机器人精度补偿方法理论与试验[J].机械工程学报,2013,49(3):42—48.
ZHOU Wei, LIAO Wen-he, TIAN Wei. Theory and Experiment of Industrial Robot Accuracy Compensation Method Based on Spatial Interpolation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(3): 42—48.
- [5] 王闯闯,何智成,成艾国.基于机器视觉和支持向量机的汽车焊点定位研究[J].汽车工程学报,2019,9(1):13—20.
WANG Chuang-chuang, HE Zhi-cheng, CHENG Ai-guo. Research on Positioning of Welding Spots Based on Machine Vision and Support Vector Machine[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2019, 9(1): 13—20.
- [6] 杨马英,郑亚飞.基于视觉反馈的机械臂预测控制[J].浙江工业大学学报,2016,44(3):260—265.
YANG Ma-ying, ZHENG Ya-fei. Predictive Control of Manipulators Based on Visual Feedback[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2016, 44(3): 260—265.
- [7] 刘志,赵正大,谢颖,等.考虑结构变形的机器人运动学标定及补偿[J].机器人,2015,37(3):376—384.
LIU Zhi, ZHAO Zheng-da, XIE Ying, et al. Kinematic Calibration and Compensation for a Robot with Structural Deformation[J]. Robot, 2015, 37(3): 376—384.
- [8] 章晓峰,李光,肖帆,等.基于BP神经网络的包装分拣机器人视觉标定算法[J].包装学报,2019,11(4):74—81.
ZHANG Xiao-feng, LI Guang, XIAO Fan, et al. Calibration of Packaging Sorting Robot Based on BP Neural Network[J]. Packaging Journal, 2019, 11(4): 74—81.
- [9] 王琨,骆敏舟,曹毅,等.基于多变量预测补偿的机械臂精度提升方法[J].电子测量与仪器学报,2014,28(11):1213—1221.
WANG Kun, LUO Min-zhou, CAO Yin, et al. Promoting Method for Manipulator Accuracy Based on Multi-variable Prediction and Compensation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(11): 1213—1221.
- [10] 陈栋梁,华云松,吴莹.基于视觉反馈的机械手运动

- 控制研究[J]. 信息技术, 2015(9): 98—101.
- CHEN Dong-liang, HUA Yun-song, WU Ying. Research of Manipulator Motion Control Based on Visual Feedback[J]. Information Technology, 2015(9): 98—101.
- [11] 庄开岚, 王吉忠, 周洁. 机器视觉技术在角度检测方面的应用研究[J]. 装备制造技术, 2011(4): 9—10.
- ZHUANG Kai-lan, WANG Ji-zhong, ZHOU Jie. Application of Machine Vision in Angle Inspection[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2011(4): 9—10.
- [12] 张文昌. Delta 高速并联机器人视觉控制技术及视觉标定技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2012: 25—35.
- ZHANG Wen-chang. Control Technique and Kinematic Calibration of Delta Robot Based on Computer Vision[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 25—35.
- [13] 王博, 汤伟, 董继先, 等. 直行程电动调节阀机械传动间隙软件补偿策略研究[J]. 流体机械, 2019, 47(7): 1—5.
- WANG Bo, TANG Wei, DONG Ji-xian, et al. Study on the Mechanical Backlash Software Compensation Strategy for Linear Type Electric Valve Actuators[J]. Fluid Machinery, 2019, 47(7): 1—5.
- [14] 郝大孝, 舒志兵, 孙学. 基于机器视觉的 Delta 机器人分拣与跟踪系统设计[J]. 机床与液压, 2019, 47(17): 36—42.
- HAO Da-xiao, SHU Zhi-bing, SUN Xue. Design of Delta Robot Sorting and Tracking System Based on Machine Vision[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(17): 36—42.
- [15] 陈永明, 李杰. 一种 Delta 机器人平移标定与动态补偿算法[J]. 机电技术, 2020(2): 28—30.
- CHEN Yong-ming, LI Jie. A Delta Robot Translation Calibration and Dynamic Compensation Algorithm [J]. Mechanical & Electrical Technology, 2020(2): 28—30.
- [16] 蔡菲, 郭倩. 基于动态抓取算法的机器人分拣研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2018(8): 10—13.
- CAI Fei, GUO Qian. Design of High Speed Sorting System for DELTA Manipulator Based on Visual Guidance[J]. Automation and Instrumentation, 2018(8): 10—13.