

包装生产线视觉送料控制系统研究

鲁刚强¹, 叶霞²

(1. 成都农业科技职业学院, 成都 611130; 2. 杭州师范大学钱江学院, 杭州 310027)

摘要: **目的** 为提高包装生产线中送料、送料过程的自动化程度, 基于机器视觉设计一种视觉送料系统。**方法** 介绍摄像机成像原理。在此基础上, 详细论述视觉标定过程, 包括刚体变换、透视投影、图像离散化等。论述视觉送料控制系统结构, 主要由工控机、软件平台、人机交互界面组成。工控机可实现视觉采集模块、机器人控制模块、传感器信号采集模块的分布控制和集中管理。通过实验验证所述控制系统的有效性。**结果** 实验结果表明, 最大定位误差只有 0.7 mm, 定位精度较高; 送料成功率可以达到 99.5% 以上, 基本不会出现误抓、漏抓等情况; 系统响应速度快。**结论** 包装生产线视觉送料控制系统具有响应速度快、定位精度高、送料成功率高等优点, 可满足包装过程高速、高精度要求。

关键词: 包装生产线; 送料; 视觉标定; 控制系统

中图分类号: TB486; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)21-0232-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.21.030

Visual Feeding Control System of Packaging Production Line

LU Gang-qiang¹, YE Xia²

(1. Chengdu Agricultural Technology Vocational College, Chengdu 611130, China; 2. Qianjiang College of Hangzhou Normal University, Hangzhou 310027, China)

ABSTRACT: The work aims to design a visual feeding system based on machine vision to improve the automation of the feeding and delivery process in the packaging production line. Firstly, the principle of camera imaging was introduced. On this basis, the visual calibration process, including rigid body transformation, perspective projection, image discretization, etc., was discussed in detail. The structure of visual feeding control system which was mainly composed of Ipc, software platform and human-computer interaction interface was discussed. Ipc could realize the distributed control and centralized management of vision acquisition module, robot control module and sensor signal acquisition module. The effectiveness of the control system was verified by experiment. The experiment result showed that the maximum positioning error was only 0.7 mm and the positioning accuracy was relatively high. The success rate of packing could reach 99.5% or above, and there would be no mis-grasping or missing grasping. The system responded quickly. The visual feeding control system of packaging production line has the advantages of fast response, high positioning accuracy and high success rate of packing. It meets the requirements of high speed and high precision in packaging process.

KEY WORDS: packaging production line; feeding; visual calibration; control system

在包装自动化生产线中, 柔性送料装置的应用比较广泛。柔性送料大多采用抖动或旋转方式完成送料, 通过振动调整物料姿态, 机器人利用机器视觉完

成物料识别和定位, 最终完成物料抓取^[1-2]。振动式送料过程可以描述为: 首先将物料添加到某平台上, 利用马达驱动该平台振动; 通过设计不同振动模式实

收稿日期: 2022-01-28

基金项目: 四川省科技计划资助 (2022YFG0177); 成都市科学技术局基金项目 (2019-YF05-00207-SN)

作者简介: 鲁刚强 (1981—), 男, 本科, 讲师, 主要研究方向为电子、嵌入式、自动控制、机器人。

现物料移动或姿态调整^[3]。该方式具有速度快、结构简单等诸多优势,但是振动效应会影响生产线中的精密器件、视觉模块等工作。振动会产生噪声,影响工厂工作环境;另外,振动上料的吞吐量比较大,一次振动会造成多个物料姿态发生变化,而抓取、包装等工艺往往针对某个特定物料,振动上料效率不高^[4-7]。为解决此问题,需要设计一种目的性更强的柔性上料装置,即从物料传送带上抓取特定物料,将其放到包装生产线的特定位置,或者监视送料装置,判断当前视域内是否存在物料、物料是否存在缺陷。如果缺料,则命令机器人抓取物料进行填补;如果物料存在残缺,则剔除并替换新的物料。随着工业机器人技术的不断发展,机器视觉的应用越来越成熟,特别是“手眼”视觉系统相关研究越来越多。赵久强等^[8]FlexiJet 柔性上料综合创新实验平台,可实现远程选料、柔性上料、视觉辅助、喷气调节位姿、机器人取放等功能。曹启贺^[9]以 KUKA 机器人为研究对象,确定了各坐标系之间的转换关系以及相关参数。谢丰隆等^[10]以六自由度机械臂为研究对象,基于 OpenCV 算法库设计了一种快速的标定方法,该标定方法结合标定板、霍夫变换和线性回归拟合,可获得准确的标定结果。

综上所述,文中以物料传送装置监视机器人为研究对象,设计一种包装生产线视觉上料系统,以实现物料检测、填料、补料等操作,并通过实验验证所述视觉上料系统的有效性。

1 摄像机成像原理

视觉成像是机器人正常工作的基础,因此文中首先阐述摄像机成像原理。摄像机成像过程类似于小孔成像,通过摄像机镜头成像将物体形状在相机成像平面展示出来。从本质上讲,摄像机成像的标定过程就是不同坐标系之间的关系换算。综合考虑,文中建立了 4 种坐标系,即摄像机坐标系、图像坐标系、世界坐标系及图像像素坐标系,前 3 种坐标系单位为 mm,最后 1 种坐标系单位为像素^[11-12]。各坐标系示意图见图 1。

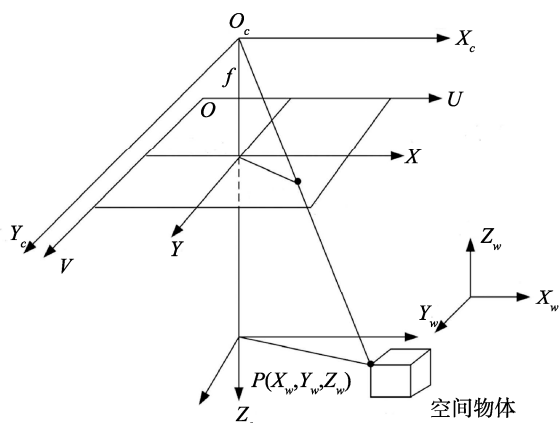


图 1 各坐标系

Fig.1 Diagram of coordinate system

如图 1 所示,世界坐标系为 $O_w-X_wY_wZ_w$,摄像机坐标系为 $O_c-X_cY_cZ_c$,图像物理坐标系包含 X 和 Y 两轴,图像像素坐标系包含 U 和 V 两轴。通过刚体变换、透视投影、图像离散等几个图像处理方法便可将物体的世界坐标系进行转换,得到图像像素坐标。

2 视觉标定

所谓刚体变换,就是通过适当的平移和旋转将世界坐标系转换为相机坐标系,其转换过程可描述为:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

为方便处理,式(1)可简化为:

$$O_c = R O_w + T \quad (2)$$

式中: R 为旋转变换矩阵; T 为移变换矩阵。利用齐次坐标变换可将式(1)进行转化,见式(3)。

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ O^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: 旋转变换矩阵 R 可分解为绕 X_w 轴的旋转矩阵 α ; 绕 Y_w 轴的旋转矩阵 β ; 绕 Z_w 轴的旋转矩阵 γ , 即满足:

$$R = R_1 R_2 R_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

文中所述视觉系统,取机器人坐标系为世界坐标系,摄像机的光轴 Z_c 和机器人 Z_w 轴基本平行,可以理解为缸体变换过程中旋转角度 α 和 β 均非常小。根据上面的分析,如果忽略角度 α 和 β 点的影响,那么式(4)就可以表示为:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

摄像机成像其实就是一个透视投影过程,通过确保像距和焦距相等便可保证实像的清晰度。根据相似三角形之间的关系,成像过程可以用式(6)进行描述。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

通过摄像机得到图像后,为了后期图像的分析处理,需要将物理图像进行离散化处理,离散后的数据再传送到计算机中,即需要将物理坐标系转换为像素坐标系。

一般情况下,成像平面均匀分布一些传感器阵列。图像到达成像平面时,阵列上相应位置传感器会获得该区域的灰度值,即像素点。上述过程可称之为图像离散化,可描述为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: dx 为 x 方向上单位像素的物理尺寸; dy 为 y 方向上单位像素的物理尺寸。由式(5)、(6)、(7)联合可以得到图像坐标系和世界坐标系之间的变换关系,即:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f \cos \gamma}{dx} & \frac{f \sin \gamma}{dx} & u_0 & \frac{fT_x}{dx} + u_0T_z \\ -\frac{f \sin \gamma}{dy} & \frac{f \cos \gamma}{dy} & v_0 & \frac{fT_y}{dy} + v_0T_z \\ 0 & 0 & 1 & T_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

在包装过程中,物料的厚度与竖直平移坐标系相比可忽略不计,因此假设物料的高度为 0,将式(8)进行简化处理后可得:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 \cos \gamma & k_1 \sin \gamma & b_1 \\ -k_2 \sin \gamma & k_2 \cos \gamma & b_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $k_1 = f/dx$ 、 $k_2 = f/dy$ 、 $b_1 = fT_x/dx + u_0T_z$ 、 $b_2 = fT_y/dy + v_0T_z$ 。

在得到原始图像后,计算机利用图像二值化、轮廓提取等方法,获取物料的轮廓和中心;根据实际情况判断当前位置是否存在物料以及物料是否完整;若物料缺少或者是物料不完整,那么就可以根据视觉标定的结果得到完整的填充位置的坐标,同时将准确的坐标发送给视觉机器人,视觉机器人在得到准确的坐标值后,就会自动抓取物料填充到对应的位置^[13-15]。

3 控制系统结构设计

基于包装生产线视觉送料控制系统的结构,见图 2。该控制系统采用工控机作为总控制器,处理主逻辑流程。该工控机配有多个 I/O 模块、RS232 和 RS485 通信模块、2 个以太网接口以及工业交换机等,可与机器人控制器、视觉采集模块、多个传感器相连接,实现控制指令下发和传感器信号接收等功能^[16-17]。

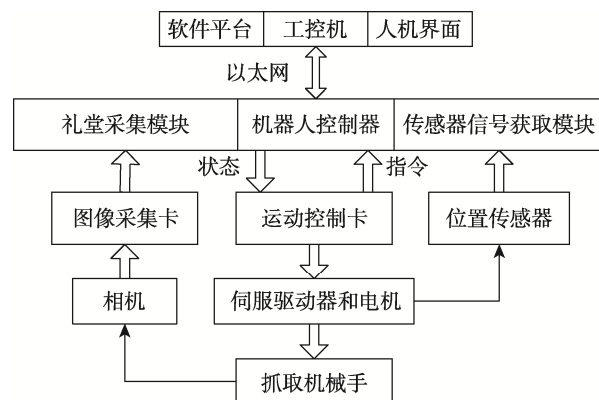


图 2 控制系统结构
Fig.2 Structure of control system

文中选用 ADT-8948A1 作为运动控制卡,该运动控制卡能够实现对机器人多个轴电机的同步运动控制。运动控制卡 ADT-8948A1 是一种高性能、多轴伺服电机控制器,其内核有 2 片专用的运动控制芯片 MCX312,该芯片不仅支持 DSP 架构,而且还拥有多种接口;该芯片具有编程简单、使用方便等特点。

文中伺服驱动器为 MIINASA5,该款伺服驱动器具有较高的定位精度,且拥有较强的抗干扰能力,该款伺服驱动器同样具备转矩控制、速度控制以及位置控制 3 种控制方式。通过该款伺服驱动器可以实现机器人的高精度定位以及定位精度反馈,从而实现机器人的闭环自动控制。

传感器信号获取模块主要用于获取机器人各轴位置,进而判断抓取执行末端的具体位置。视觉采集控制包括工业相机、图像采集卡以及视觉采集模块,工业相机选用高分辨率、大视域、快速响应类抗干扰相机。

人机界面为常见的触摸屏。

包装生产线视觉送料流程可以描述如下。

- 1) 备用物料到位,由机器人通过视觉标定确定备用物料位置并存储其坐标,便于以后使用。
- 2) 送料装置正常运转,借助机器人末端执行器的大视角工业相机采集送料装置图像。
- 3) 通过图像处理判断当前物料是否完整或缺料。
- 4) 如果物料残缺或缺料,则执行剔除操作,通过视觉标定获取目标位置坐标并传送至机器人,机器人根据物料坐标和目标位置坐标实现抓取、补料等操作。

4 实验测试

为了验证该系统的性能,进行了以下几个方面的测试,其测试内容主要包括定位精度、抓取速度以及填充成功率。

搭建前文所述控制系统并将其移植到某厂包装生产线,见图 3。机器人连续工作 1 h,传送速度分别设

定为 30、40、50、60、70、80、90、100、150、200 mm/s, 每个传送速度下随机抽取 100 个样本, 计算定位精度并取平均值。首先, 设定理论坐标值并存储到计算机; 然后, 根据设定值和反馈值之差生产控制信号并将其传送到机器人控制器; 接着, 驱动机器人完成相应动作; 最后, 记录机械手实际位置, 具体结果见表 1。

由表 1 可以看出, 随着传送带速度增加, 定位精度虽有下降, 但是定位精度仍然很高, 最大绝对误差只有 0.7 mm, 说明所述视觉上料控制系统具有较高的定位精度。

在抓取速度方面, 受益于工业相机和控制系统的快速响应能力, 机器人完全可以适应传送带的高速度, 基本不会出现漏抓、误抓的情况。实验表明, 采用文中所述控制系统传送带速度可以达到 220 mm/s。

在填料成功率方面, 当传送带速度低于 100 mm/s 时, 可以确保填料成功率为 100%, 当传送带速度增加, 偶尔会出现误抓或漏抓情况, 但是整体成功率仍可以达到 99.5% 以上。

综上所述, 包装生产线视觉上料控制系统具有响应速度快、定位精度高、填料成功率高等优点, 可满足包装过程高速、高精度要求。

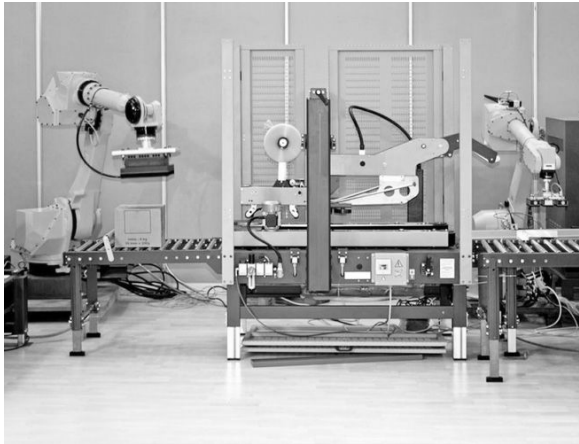


图 3 实验装置
Fig.3 Experimental device

表 1 实验结果
Tab.1 Experimental results

传送带速度/(mm·s ⁻¹)	设定值		实际值		绝对误差	
	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向
30	0	50	0	50.4	0	0.4
40	0	-50	0	-50.4	0	0.4
50	50	0	50.3	0	0.3	0
60	-50	0	-50.2	0	0.2	0
70	50	50	50.3	50.4	0.3	0.4
80	50	50	50.4	50.4	0.4	0.4
90	50	50	50.5	50.4	0.5	0.3
100	50	-50	50.4	-50.5	0.4	0.5
150	50	50	50.5	50.6	0.5	0.6
200	50	-50	50.5	-50.7	0.5	0.7

5 结语

以包装生产线上料过程为研究对象, 针对送料装置可能存在缺料或物料不完整等情况, 设计了一种基于视觉的自动机器人上料系统。文中着重论述了机器视觉标定的整个过程和控制系统的的设计方法。对空料、物料不完整等情况, 控制系统会自动剔除并抓取备用物料进行填补。根据实验得出的结果可知, 该系统具有较高精度的定位、响应速度快等特点, 可满足包装生产线的控制要求。下一步, 可从物料形状识别、不同缺陷判定等方面入手, 进一步增加系统功能, 提高智能化程度。

参考文献:

[1] 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): 98-102.
CHEN Dong-liang, HUA Yun-song, WU Ying. Research of Manipulator Motion Control Based on Visual Feedback[J]. Information Technology, 2015(9): 98-102.

[2] 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.

[3] 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.
- [4] 方雨, 李大寨, 林闯. 基于机器视觉的传送带分拣技术研究[J]. 机械工程与自动化, 2018(6): 173-175.
FANG Yu, LI Da-zhai, LIN Chuang. Research on Sorting Conveyor Technology Based on Machine Vision[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2018(6): 173-175.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 赵久强, 冯毅萍, 王凯军, 等. FlexiJet 柔性上料综合创新实验平台研制[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(2): 86-89.
ZHAO Jiu-qiang, FENG Yi-ping, WANG Kai-jun, et al. Development of FlexiJet Flexible Feeding Comprehensive Innovation Experimental Platform[J]. Experimental Technology and Management, 2020, 37(2): 86-89.
- [9] 曹启贺. 基于工业机器人视觉的摄像机标定系统[J]. 智慧工厂, 2019(6): 71-73.
CAO Qi-he. Camera Calibration System Based on Industrial Robot Vision[J]. Smart Factory, 2019(6): 71-73.
- [10] 谢丰隆, 韩建海, 李向攀. 一种快速的机器人固定视觉标定方法[J]. 机械设计与制造, 2018(11): 237-240.
XIE Feng-long, HAN Jian-hai, LI Xiang-pan. A Fast Way of Stable Camera Calibration with Robot[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(11): 237-240.
- [11] 徐伟, 杜建, 马永, 等. 基于视觉的物料自动分拣控制系统设计[J]. 盐科学与化工, 2018, 47(5): 42-44.
XU Wei, DU Jian, MA Yong, et al. Design for Control System of Automatic Sorting of Material Based on Vision[J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2018, 47(5): 42-44.
- [12] 倪鹤鹏, 刘亚男, 张承瑞, 等. 基于机器视觉的 Delta 机器人分拣系统算法[J]. 机器人, 2016(1): 49-55.
NI He-peng, LIU Ya-nan, ZHANG Cheng-rui, et al. Sorting System Algorithms Based on Machine Vision for Delta Robot[J]. Robot, 2016, 38(1): 49-55.
- [13] 邓明星, 刘冠峰, 张国英. 基于 Delta 并联机器人的传送带动态跟踪[J]. 机械工程与自动化, 2015(1): 153-154.
DENG Ming-xing, LIU Guan-feng, ZHANG Guo-ying. Dynamic Conveyor Tracking for Delta Robot[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2015(1): 153-154.
- [14] 王耀南, 陈铁健, 贺振东, 等. 智能制造装备视觉检测控制方法综述[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(3): 273-286.
WANG Yao-nan, CHEN Tie-jian, HE Zhen-dong, et al. Review on the Machine Vision Measurement and Control Technology for Intelligent Manufacturing Equipment[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(3): 273-286.
- [15] 焦恩璋, 杜荣. 工业机器人分拣技术的实现[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010(2): 84-87.
JIAO En-zhang, DU Rong. Realization of Sorting Technology on Industrial Robot[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2010(2): 84-87.
- [16] 康瑞芳, 刘鑫. 包装码垛机器人嵌入式控制系统设计[J]. 包装工程, 2018, 39(1): 132-135.
KANG Rui-fang, LIU Xin. Embedded Control System Design of Packaging Palletizing Robot[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(1): 132-135.
- [17] 吴安成, 何卫锋, 欧阳祥波. 基于 OpenCV 的码垛机器人手眼标定方法[J]. 制造技术与机床, 2018(6): 45-49.
WU An-cheng, HE Wei-feng, OUYANG Xiang-bo. A Method of Hand-Eye Calibration for Palletizing Robot Based on openCV[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018(6): 45-49.

责任编辑: 曾钰婵