

基于激光阵结构光 3D 工业相机的自动分拣系统设计

韩立洋¹, 马服辉^{2*}, 石佑敏², 王 涛²

(1. 苏州工业园区职业技术学院, 江苏 苏州 215123; 2. 苏州大学, 江苏 苏州 215123)

摘要: 本文探讨了在工业 4.0 背景下, 基于激光阵结构光 3D 工业相机的自动分拣系统设计与实现。该系统通过集成机器视觉技术, 实现了对复杂工件的精确识别、定位和分拣, 提高了生产效率和准确性。自动分拣系统集成了手眼标定、物料布局图预处理、图像捕捉、目标识别与分类、姿态估算和抓取策略规划等关键功能。利用 Harris3D 角点检测算法, 系统能够有效判别零件位姿, 制定合理的抓取策略, 并通过 TCP/IP 实现各组件间的通信。此外, 系统还具备设备运行监控、异常状况处理、警报系统及日志记录管理等功能, 确保了智能制造产线的无人自动化运行。

关键词: 3D 工业相机; 自动分拣系统; 机器视觉; 智能制造

中图分类号: TP-21 **文献标志码:** A

1 引言

随着工业 4.0 的提出, 以智能制造为基础的自动化产线迅速发展。通过计算机编程指令控制工业机器人完成分拣、传送、装配等重复性相对较高、复杂性相对较强的任务已越来越受到制造类企业的重视和应用^[1-2]。

对于自动化分拣来说, 工业机器人需要借助“眼睛”才能完成精细复杂零件的分拣^[3]。在这其中, 基于机器视觉的自动化分拣系统成为重要的一环^[4]。相比于传统的人工分拣方式, 自动分拣系统在效率、准确率、经济成本

等方面都具有较大的优势^[5], 国内外也对于这方面持续投入了较多的研究。1959 年, 美国人约瑟夫率先发明了世界上第一台工业机器人, 从此之后, 工业机器人便迅速进入人类生产中的各个方面。随着工业技术、电子技术等的不断发展, 分拣系统在机械制造、医药、物流等领域发挥了重要作用。为进一步提高生产效率, 对于自动分拣系统的研究一直是智能制造领域的热点。最早的是美国的一家机器人公司研发了结合机器视觉的自动分拣工业机器人, 这种工业机器人可以自动规划运动轨迹,

基金项目: 江苏省高校工程训练教学研究项目立项项目 (JSGX-JY202412)

* 通信作者: 马服辉

同时借助对于目标位置的识别和获取,实现对于目标的自动分拣^[6]。紧随其后,美国普渡大学的相关人员开发了一种通过对于工件不同形状特征的判断来区分工件的工业机器人,从而实现从混装不同形状零件的框中准确抓取特定零件的功能^[7]。此外,日本一家公司也研发了一套视觉系统,该系统借助 2D 和 3D 相机的混合使用,可以实现对于平面及立体场景中工件的定位,然后借助机械臂的运动实现对于目标工件的抓取^[8]。

在关于工业机器人的相关研究上,国外的起步是远早于国内的,但随着我国制造业水平的不断发展,尤其是近些年来,在人工智能、机器视觉、数字化制造方面体现了巨大的后发优势。新松公司所研发的一种工业视觉机器人可对骰子进行定位并判断出正面点数是多少,将视觉算法与 Delta 分拣机器人协作,可以实现对不同点数骰子的快速分拣也能应用到其他类似工件的识别和分拣上^[9]。东南大学将机械手臂和相机进行智能搭配,通过对图像的灰度、形貌的处理,将点云分割算法和模板匹配算法结合在一起,可以实现对于传送带上目标物体的快速分拣;华中科技大学邹腾跃等提出了一种基于离散特征点集的物体轮廓表示方法,并利用形状匹配技术完成物料分类^[10]。此外,李宇飞等构建的视觉系统能够辅助机器人进行位姿的精确调整,从而确保目标抓取更加准确。但总体而言,我国在基于机器视觉的自动分拣系统上的研究与国外发达国家相比还有一定的差距^[11]。

现有的视觉技术大多集中在二维图像的处理和较为简单的三维重建上,对于精细复杂工件难以表达特定目标的位姿信息。随着基于激光阵结构光 3D 工业相机的发展和完善,自动化分拣中采用 3D 视觉的解决方案更具有应用前景。相比于普通的单目相机,3D 工业相机增加了一个维度的信息,且其对外界环境光的干扰有较好的过滤性能。2017 年,瑞士堡盟公司研发了 LX VisualApplets 相机,该相机最大的特点是可在嵌入式系统中快速完成图像的处理^[12]。在高速三维测量领域,德国 Automation Technology GmbH 公开发了一系列基于 3D 技术部件和一体化产品用于较高速下的三维测量^[13]。在国内,以海康威视为代表一大批工业视觉公司也开发了大量的产品,海康威视所研发的基于 X86 架构的处理平台,所开发的线激光方案的 MV-DL1617-05L 型立体相机在物流、仓储等领域应用非常广泛^[13]。总体来看,在 3D 工

业相机的研发和使用上,国内还处于追赶的阶段。目前国内主要存在的问题主要包括产品种类不够丰富、识别效果和数据处理不够理想、价格优势不明显等方面。在一些自动化程度比较高的企业,大部分采用的还是进口相机。

虽然基于视觉技术、工业机器人技术已发展得较为完善,基于工业相机的自动化分拣系统近些年来也日趋成熟,但这些系统常常针对固定大型有序目标的分拣场景,主要是在结构化的环境中,依托工件坐标的设定和示教器的示教来抓取物体,当物体的形状或位置发生变化时,就必须重新示教才能完成物体的抓取,这种方式阻碍了工业机器人完全自动化,尤其是在柔性生产线中的应用。所以,研究一种对复杂无序堆叠工件的精确识别、定位和分拣系统显得非常有意义。

2 自动分拣系统方案设计

根据分拣目标的实际需求,搭建自动化分拣系统。通过激光阵结构光 3D 工业相机的引导,工业机器人可以完成物料的抓取和放置操作,配合智能吊具的使用,可以实现自动化分拣、码垛等常用工序,实现整个智能制造产线的无人自动化运行。通过相机支架、工业机器人底座、工具手安装法兰盘等特定结构件完成硬件的布置。软件部分依靠基于 Linux 系统的工控机完成开发。3D 相机、工业机器人、工控机和 PLC 系统等通过 TCP/IP 完成通信。

自动化分拣系统所涉及到的主要功能包括手眼标定、物料布局图的判别、图像捕捉与分类、工业机器人位姿判断、末端执行器抓取策略及路径规划等^[14]。除上述功能外,还具备数据汇总分析、产线运行监控、突发状况自处理和警报系统等。在满足基本运行的同时,可对关键事件进行记录和追溯,方便故障查找和分析。配备相应的上位监控系统可实时监控整个系统的运行情况并进行实时显示,从而达到信息化管理的目的。

自动分拣系统主要依靠基于激光阵结构光 3D 工业相机,通过机器视觉捕捉待抓取目标的特定信息,结合 Harris3D 角点检测算法,完成对于零件位姿的判别、工业机器人抓取状态的规定、抓取策略的制定、抓取后的处理,以及相关异常情况的策略规划与管理,从而最终实现对于物料的自动化分拣及码垛的功能。系统的结构框图如图 1 所示。

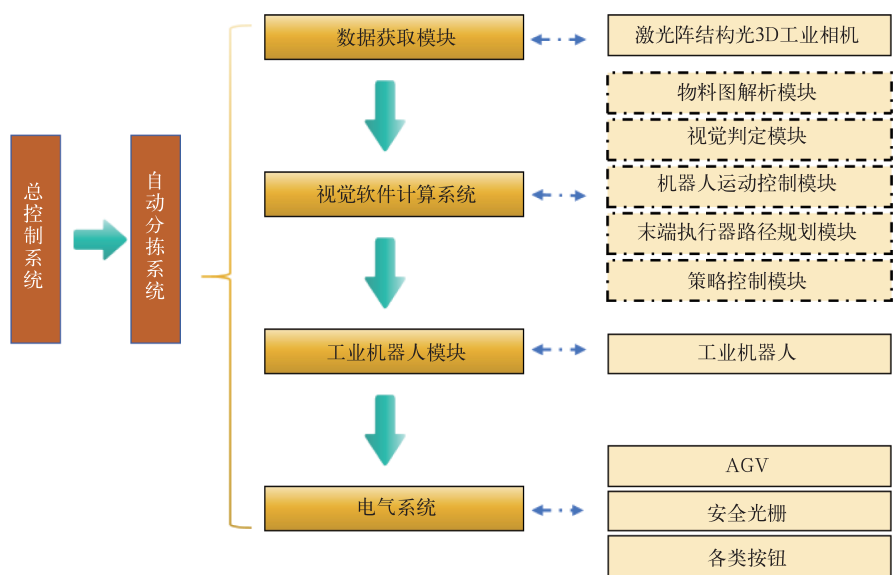


图1 自动分拣系统结构框图

本自动分拣系统主要抓取的工件是不规则的薄片类钢板件，工业机器人将此类薄片钢板件抓取后码放到输送线上进行下一步的加工。针对不同零件差异的场景进行优化，通过上层系统获取钢板的套料图信息，结合 2D 和 3D 相融合的视觉技术及抓手的自定义抓取算法的控制，实现对于工业机器人工具的精确控制，从而避免对存有裂缝或者其他不符合要求零件的抓取。分拣区域配置列表见表 1。

表 1 分拣区域配置列表

产品	类别	配置套数
3D 工业相机	激光阵列结构光	1
软件包	混合分拣系统软件包	1
视觉工控机	包含独立 CPU	1
各类辅件	配线、支架、标定设施	1

3D 工业相机是自动化分拣系统数据信号获取模块的关键装置，其主要作用是采集相应的图样信息并将其传送给视觉计算系统进行处理。基于混合分拣时工况复杂、节拍较快的情况，拟定 1 台工业相机对应 1 台工业机器人的形式部署在产线上。视觉控制系统逻辑结构示意图如图 2 所示。

对于 3D 工业相机而言，其主要任务是获取混合分拣模块的实时信息，如图 2 所示。在实际分拣过程中，因为薄壁钢板是无序堆放的，所以工况较为复杂，同时整

条产线的节拍较快，因此工业相机布置在较为稳定的输送线的正上方的位置，相机的参数见表 2。

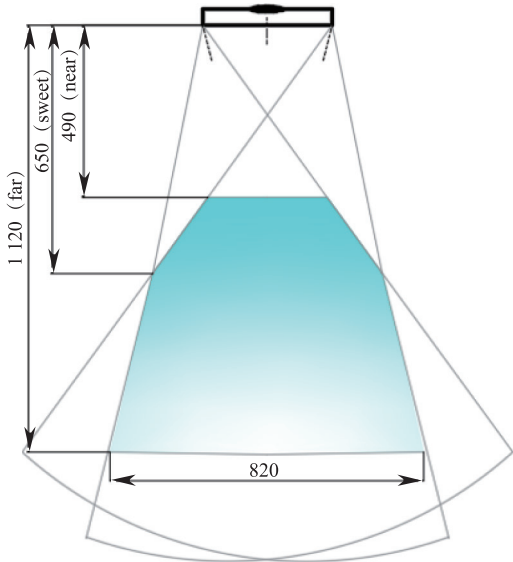


图 2 视觉控制系统逻辑结构示意图

表 2 相机参数

参数	数值
扫描范围	1 680mm × 3 780mm
像素 /W	800
扫描区域（聚焦距离）	1 680mm × 1 500mm
焦点距离 /mm	0.95
3D 点云传输效率 /（点 /s）	1 600

自动分拣系统的动作指引主要处理单元视觉计算系统。该系统组成部分包括物料图解析模块、视觉判定模块、机器人运动控制模块和末端执行器路径规划模块等^[15]。3D工业相机利用激光阵结构光技术获取物料的三维数据，通过预处理和滤波算法提高数据质量，并将处理好的数据传送给视觉计算系统进行计算，生成用于控制机器人、末端执行器，以及系统自主运行的相关指令和数据。

物料图解析模块是用来分析和处理通过视觉相机获取的物料图像，以提取关键信息和特征，并对获取的原始图像进行去噪、增强、二值化等处理，以提高图像质量和后续分析的准确性。

视觉判定模块使用算法（如深度学习模型）检测图像中的物料位置，并标记出其边界框，然后将图像信息进行转化处理，形成系统可以直接使用的二进制数据^[16]。

机器人运动模块是将视觉相机作为其感知外界环境的重要工具^[17]。工业机器人的姿态、位置等参数也会由视觉相机进行获取并转化为电信号传递给工业机器人控

制柜，从而实现对于机器人运动的闭环反馈，保证运动的准确性和持续性。

末端执行器路径规划模块将视觉系统解析得到的信息以数据的形式传递给控制末端执行器运动的PLC，进而转化为机器人可以理解和执行的控制指令带动末端执行器实现精确运动和控制，完成精准的抓取和码放操作。

策略控制模块综合分析由工业相机捕捉并预处理后的信息，并对这些信息进行分类判断，负责协调和管理各个组件的运行，最终完成任务规划、算法的选择和参数调整、资源管理分配，以及结果验证与反馈等功能，确保分拣和放置的有序性和准确性^[18]。

除了上述模块外，系统还将工业机器人的示教编程、PLC的控制编程、各类光电传感器、各类开关按钮和安全光栅等电气系统结合在内。通过计算系统的统一控制，接收视觉控制系统提供的外部坐标数据，以此来驱动工业机器人完成相关关节的协作运动，保障整个分拣的自动化和智能化运行，系统的拓扑图如图3所示。

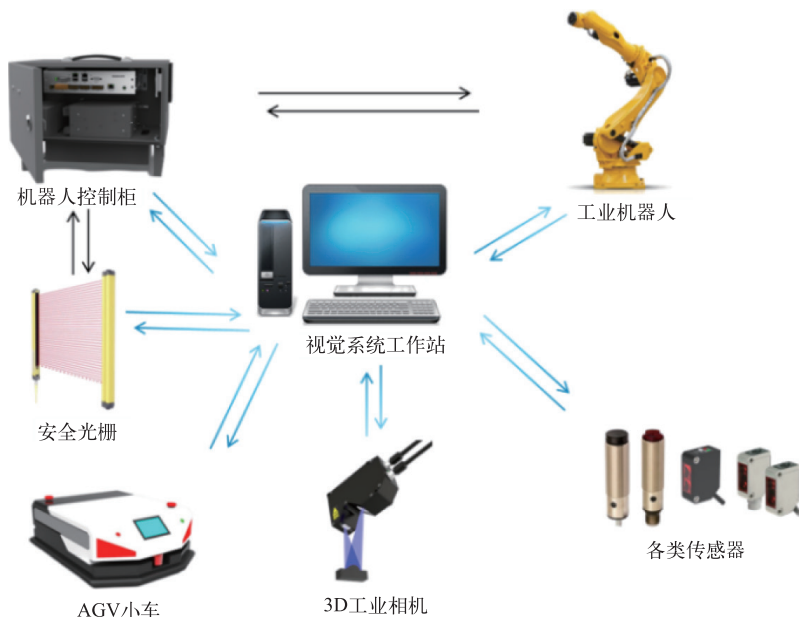


图3 自动分拣系统拓扑图

自动分拣系统通过激光阵结构光3D工业相机直接获取对应视野范围内物料的三维点云数据，根据分割后的各部分点云子集的位置和数量信息，定义一个抓取分数以评估各目标点云的上下层级关系，从而帮助工业机器人实现自上而下的抓取。通过对被抓取物体形状的判别，

避免抓取废料，提高抓取的准确率，完成正常物料和异常物料的分类。完成整个步骤需要经历定位寻边、物料图解析等来确定物料的形状及位置。相关信息确定后，根据物料的大小形状关系通过末端执行器来进行抓取、搬运和码垛。定位寻边视觉软件参数见表3。

表 3 定位寻边视觉软件参数表

参数	数值
精度 /mm	≤ 1
拍摄时间 /s	≤ 4
视觉识别时间 /s	≤ 4
视图解析准确度	$\geq 99\%$
引导视野	视安装情况确定

3 自动分拣系统控制系统逻辑说明

自动分拣系统的主要逻辑来源于两大部分，一个是

各模块与视觉软件计算系统之间的通信计算，另一个是各模块与 PLC 控制系统之间的电气协调控制，其示意图如图 4 所示。整个逻辑过程：首先在外部按钮的控制下通过传送带或 AGV 小车将待分拣零件传输至 3D 工业相机的下方，工件到达指定位置后传递到达信号给 PLC，PLC 控制视觉工控机引导相机完成拍照并进行数据采集传输至视觉软件计算系统，通过目标检测算法完成被测目标的形位信息和坐标信息传递给机器人系统中，为引导工业机器人分拣做好准备，工业机器人模块对所有获取的信息进行分析，控制机械臂完成工件的分拣工作。

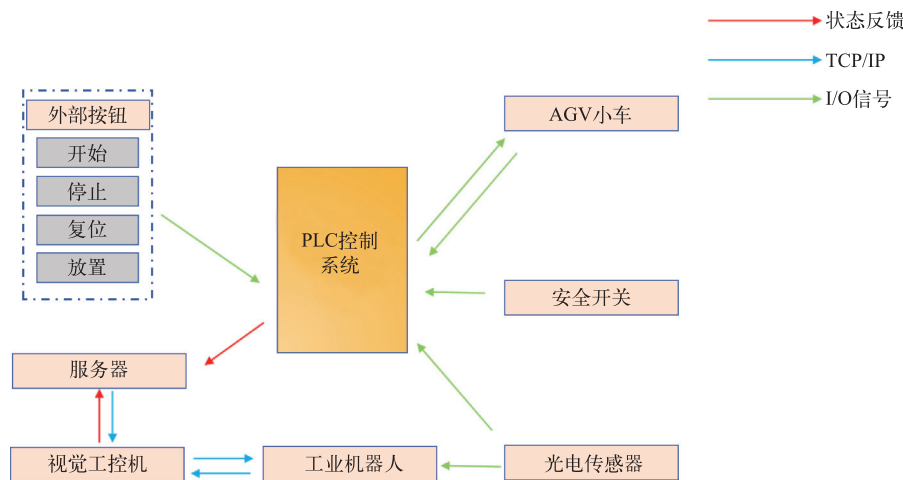


图 4 自动分拣系统逻辑结构示意图

3.1 PLC 的选型及 I/O 口的分配

与单片机和继电器控制相比，采用 PLC 的控制方式可靠性更高、操作更为简单且稳定性及使用寿命更长。本自动分拣系统 PLC 型号选择西门子的 S7-1200。该款 PLC 具有高度的集成化、出色的扩展性、较好的易用性及较强的灵活性，适用于多种工业自动化控制任务，可以出色地完成逻辑控制和实时通信任务。其具备 24 个 I/O 点数，其中输入有 14 个，输出有 10 个，在 CPU 模块的两侧还可以分别扩展出 3 个通信模块和 8 个信号模块，根据自动分拣系统的要求，I/O 口分配见表 4。

3.2 工业机器人运动控制

工业机器人的运动控制系统共分为两个维度，分别是控制维度和执行维度。控制维度主要根据视觉工作站获取的待抓取对象的信息，采用一定的算法控制工业机器人各自由度进行运动并计算出末端执行机构所提供的抓力，最后将该指令发送给执行维度，即完成对应的路径规划。执行维度则根据所获取的路径规划，规定各

个执行机构的协同运动，完成抓取任务。机器人运动控制系统示意图如图 5 所示。

表 4 I/O 口分配表

端口	端口分配内容			
输入 端口 DI	设备停止按钮	I0.0	设备开始按钮	I1.0
	工业机器人左右限位	I1.1	安全信息正常	I0.1
	设备复位按钮	I0.2	工件放置	I0.3
	AGV 小车启动	I0.4	工业机器人夹爪夹紧	I0.5
	工业机器人夹爪松开	I0.6	分拣完成	I1.2
	抓取完成信号	Q0.0	传送带电机运动	Q0.1
输出 端口 DO	正常运行	Q0.2	设备故障信号	Q0.3
	停止运行信号	Q0.4	工业机器人抓取信号	Q0.5

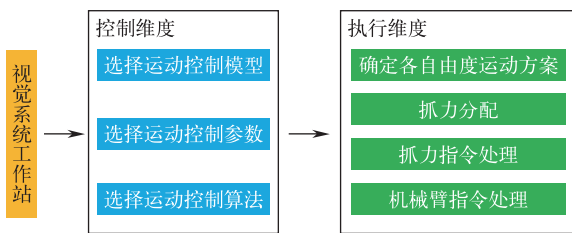


图5 机器人运动控制系统示意图

3.3 自动分拣系统主要完成的动作

手眼标定：视觉工控机通过获取相机与机器人末端执行器（如机械臂的末端）之间的相对位置和姿态关系，引导工业机器人运动，通过图像采集、特征提取、初始估计、优化与迭代，以及验证与测试等一系列步骤完成工业机器人的手眼自动化标定。

工业机器人自主运动：视觉软件根据目标物体的位置和姿态，在考虑避障和关节限制的前提下，计算机械臂的最佳运动路径。系统还会实时监控机械臂的状态，并根据反馈信息进行必要的调整，以确保任务的顺利完成。

拍照、抓取与码放：工业机器人运动到指定位置后会向 PLC 发送位置到达信号，PLC 通过逻辑指令触发工业相机进行拍照，图像信息发送给视觉软件计算系统获得工业机器人当前姿态及待码垛坐标等信息，并将相关坐标回传给工业机器人控制柜引导工业机器人协同运动。

输入输出信号的控制：外设传感器、AGV 等 I/O 信号通过 PID 控制进行精确调节，实时调整控制信号，确保系统快速响应变化并减少稳态误差，及时将讯息反馈给分拣系统，完成任务的规划和调度。

4 结束语

基于激光阵结构光 3D 工业相机的自动分拣系统，通过集成先进的机器视觉技术和智能控制算法，实现了对复杂工件的精确识别、定位和分拣。该系统在无序堆叠零件的自动化工业生产中有比较好的现实意义，但因为算法运算的数据较大，在相机识别和系统响应的效率上还有一定的工作要完善。IM

参考文献

- [1] 郭倩, 汪苏, 沈忠睿, 等. 基于结构光技术的 3D 激光扫描测量系统[J]. 数据采集与处理, 2012, 27 (S1): 106-110.
- [2] 魏明贤. 基于线结构光的激光焊缝视觉检测系统研

究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2022.

- [3] 刘明生, 刘南生, 郭昌荣, 等. 基于结构光视觉传感的焊缝视觉信息检测和识别研究[J]. 焊接, 2007 (1): 28-31, 62.
- [4] 闫珊, 姚立波, 张岩. 基于智能相机的工业机器人分拣系统设计[J]. 常州信息职业技术学院学报, 2019, 18 (5): 20-23, 82.
- [5] 刘昌军. 激光切割智能化生产线设计与产能分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.
- [6] 葛动元. 面向精密制造与检测的机器视觉及智能算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [7] RAHARDJA K, KOSAKA A. Vision-based bin-picking: recognition and localization of multiple complex objects using simple visual cues[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS' 96. IEEE, 2002.
- [8] CONNOLLY C. A new integrated robot vision system from FANUC Robotics[J]. Industrial Robot, 2007, 34 (2): 103-106.
- [9] 张英哲. 基于视觉的机器人自动分拣系统设计与实现[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.
- [10] 熊超有, 邓漂, 薛富元, 等. 工业机器人视觉分拣系统应用设计[J]. 科技创新与应用, 2023, 13 (23): 46-49.
- [11] 毛剑飞, 诸静. 工业机器人视觉定位系统高精度标定研究[J]. 机器人, 2004 (2): 139-144.
- [12] 佚名. 堡盟 LX VisualApplets 3D 相机[J]. 自动化博览, 2017, 34 (1): 9.
- [13] 朱泽奇. 基于双目视觉的嵌入式 3D 工业相机控制系统研究与设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [14] 靳璞磊. 基于智能相机和工业机器人的自动分拣技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [15] 周迪. 基于机器视觉的工业机器人分拣研究全控制[J]. 黑龙江科技信息, 2022 (24): 153-156.
- [16] 许剑波. 一种基于工业机器人的自动分拣系统: CN201921040815.7[P]. 2020-05-29.
- [17] 赵岚, 唐国寅, 温秀兰, 等. 基于 3D 视觉的机器人分拣实验系统研究与设计[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2023, 15 (5): 604-611.
- [18] 蒋伟. 基于图像处理技术的工业分拣机器人研究与应用[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.

收稿日期: 2024-11-29