

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90185

# 基于双目视觉的食品分拣 Delta 机器人 定位抓取技术

Food sorting Delta robot positioning and grasping  
technology based on binocular vision

米西峰<sup>1</sup> 尚展奎<sup>2</sup> 范媛媛<sup>1</sup> 孟晓川<sup>3</sup>

MI Xi-feng<sup>1</sup> SHANG Zhan-lei<sup>2</sup> FAN Yuan-yuan<sup>1</sup> MENG Xiao-chuan<sup>3</sup>

(1. 焦作师范高等专科学校, 河南 焦作 454000; 2. 郑州轻工业大学, 河南 郑州 450002;

3. 燕山大学, 河北 秦皇岛 066004)

(1. Jiaozuo Normal College, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450002, China; 3. Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**摘要:**目的:解决 Delta 机器人在食品分拣中定位精度差、抓取成功率低等问题,提高机器人的柔性抓取能力。方法:在现有双目视觉和 Delta 机器人技术的基础上,提出一种基于双目视觉的 Delta 机器人柔性抓取方法。采用张正友标定方法对相机进行标定,通过弦中点 Hough 变换对目标进行识别和定位,根据 PID 跟踪抓取控制 Delta 机器人抓取动态目标。通过试验对单目标分拣和多目标分拣性能进行分析,验证该方法的可行性。结果:该方法能够准确、快速、稳定地对目标进行动态抓取(成功率在 94.0% 以上)。结论:双目视觉与 Delta 机器人相结合可以有效提高机器人的定位精度和分拣抓取的成功率。

**关键词:**Delta 机器人;食品分拣;双目视觉;Hough 变换;PID 跟踪抓取

**Abstract: Objective:** Solve the problems of poor positioning accuracy and low grasping success rate of the Delta robot in food sorting, and improve the robot's flexible grasping ability. **Methods:** Based on the existing binocular vision and delta robot technology, a flexible grasping method of delta robot based on binocular vision was proposed. Zhang Zhengyou calibration method was used to calibrate the camera, the target was identified and located by Hough transform at the chord midpoint, and the delta robot was controlled to grasp the dynamic target according to PID tracking and grasping. The feasibility of this method was verified by analyzing the performance of single target sorting and multi-target sorting. **Results:** This method can accurately, quickly and stably

grab the target dynamically (success rate was above 94.0%).

**Conclusion:** The combination of binocular vision and delta robot can effectively improve the positioning accuracy of the robot and the success rate of sorting and grasping.

**Keywords:** Delta robot; food sorting; binocular vision; Hough transform; PID tracking grab

近年来工业技术和互联网技术的快速发展,促进了机器人技术的进步<sup>[1]</sup>。Delta 机器人是一种自由度较少的工业机器人,由于速度快、精度高,被广泛应用于食品、医疗等轻工业领域<sup>[2]</sup>。双目立体视觉将工业机器人的运动范围从二维平面扩展到了三维空间,使机器人柔性、灵活和高效更佳。

机器人分拣的前提是目标定位和抓取方式的选择,目前,国内外许多学者对定位和抓取方式进行了研究。刘海龙等<sup>[3]</sup>提出了一种基于机器视觉的机器人定位技术,能够更准确地引导机器人实现立体定位,误差小于 0.5 mm,可以满足工业生产的一般性需求。曾劲松等<sup>[4]</sup>提出了一种基于双目视觉引导的机器人定位与抓取技术,实现了对目标的精确定位和抓取,系统的距离定位误差小于 0.5 mm,而且该方法适应性强,可用于抓取各种工件。林义忠等<sup>[5]</sup>回顾了当前视觉机器人抓取系统关键技术的研究现状,分析总结了相关的图像识别技术,并探讨了这些技术未来的发展方向。倪鹤鹏等<sup>[6]</sup>提出了一种基于机器视觉的 Delta 机器人分拣方法,该方法的最快分类速度为 110 次/min,误抓取率小于 2%,漏抓率为 0。上述方法在实际生产中,机器人定位与抓取存在实时性差、操作不稳定、效率低等问题,应用范围受到限制。

研究拟提出一种基于双目视觉的 Delta 机器人柔性

基金项目:河南省软科学研究项目(编号:212400410223)

作者简介:米西峰(1975—),男,焦作师范高等专科学校副教授,硕士。E-mail: lizb5566@163.com

收稿日期:2021-12-05

抓取方法。采用张正友标定方法对相机进行标定,通过弦中点 Hough 变换对目标物进行识别和定位,根据 PID 跟踪抓取控制 Delta 机器人抓取动态目标,并通过试验验证方法的可行性,以期为机器人智能化的发展提供一定的参考。

### 1 系统概述

机械手要抓住传送带上的物体,必须有性能良好的视觉控制系统<sup>[7]</sup>。整个系统不仅需要快速识别目标并获得目标位置和形状信息,还需要控制机械手快速抓取目标并将其放置在指定位置<sup>[8]</sup>。图 1 为 Delta 机器人的系统结构。主要由视觉系统和运动控制系统组成,运动控制为核心部分,主要完成机器人本体的运动规划和抓取。视觉系统完成信息的采集、分析和交互等功能。

### 2 定位与抓取技术

系统总体流程如图 2 所示,该系统的主要部分有:图像采集、双目相机内外参数标定、图像识别与定位、控制抓取<sup>[9]</sup>。文章主要研究图像识别与定位和抓取策略。

#### 2.1 相机标定

使用张正友标定方法对相机进行标定,棋盘格标定板可以自行打印<sup>[10]</sup>。获取外参数  $R$ 、 $t$  和内参数  $k_x$ 、 $k_y$ 、 $u_0$ 、 $v_0$ 。

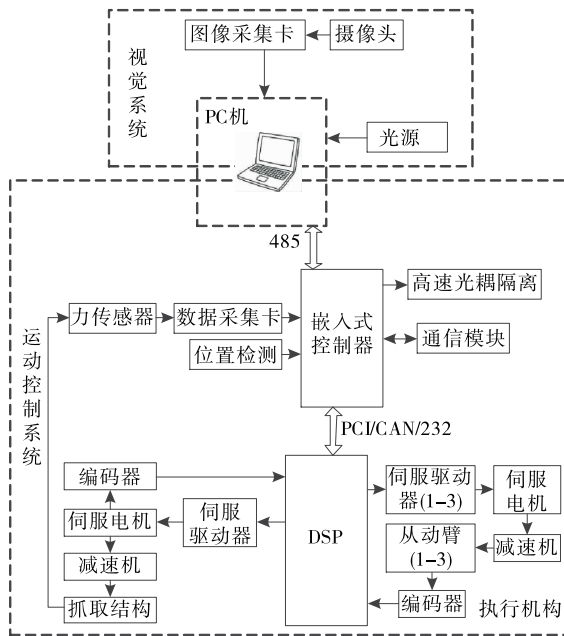


图 1 系统结构

Figure 1 System structure

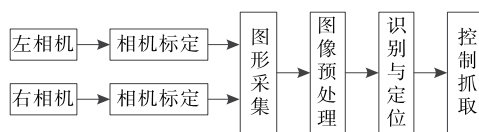


图 2 系统流程图

Figure 2 System flow chart

在实现一台相机标定的基础上,对左右相机进行标定,即求解两台相机的内外矩阵参数。两台相机的关系矩阵如式(1)和式(2)所示<sup>[11]</sup>。

$$R = R_1 R_2^{-1}, \tag{1}$$

$$t = t_1 - R_1 R_2^{-1} t_2, \tag{2}$$

式中:

$R$ ——左、右相机之间的旋转矩阵;

$R_1$ ——左相机的旋转矩阵;

$R_2$ ——右相机的旋转矩阵;

$t$ ——左、右相机之间的平移向量;

$t_1$ ——左相机的平移向量;

$t_2$ ——右相机的平移向量。

世界坐标系一点  $Q_w$  在两个相机中的坐标为  $Q_{c1}$  和  $Q_{c2}$ 。双目世界坐标和相机坐标之间的关系可以通过式(3)和式(4)中所示的变换关系获得<sup>[12]</sup>。

$$Q_{c1} = t_1 + R_1 Q_w, \tag{3}$$

$$Q_{c2} = t_2 + R_2 Q_w, \tag{4}$$

式中:

$Q_{c1}$ ——世界坐标系一点  $Q_w$  在左相机的坐标;

$Q_{c2}$ ——世界坐标系一点  $Q_w$  在右相机的坐标。

将式(3)和式(4)进行联立可去掉  $Q_w$ ,得到两个相机位置的矩阵关系如式(5)所示<sup>[13]</sup>。

$$Q_{c1} = t_1 - R_1 R_2^{-1} t_2 + R_1 R_2^{-1} Q_{c2}. \tag{5}$$

#### 2.2 图像识别与定位

Hough 变换是几何图形识别的基本方法之一,原理是连接边缘形成平滑的边缘。当 X-Y 平面上的圆转换到 a-b-r 空间上,圆上点对应于参数空间中的所有圆锥面,这些圆锥面必须有一个点相交,如图 3 所示。

获取二值图像上的任何特征点(由特征点和背景点组成),将该点  $A_0$  连接到其他特征点  $A_n$  的线段,并将这些线段的中点组成的曲线为该点的中点曲线,如图 4 所示<sup>[14]</sup>。

对于圆上的随机点  $A_0$ ,将圆上的其他点  $A_1 \sim A_n$  连接到该点  $A_0$ ,在圆中形成一组弦,有一个共同的端点  $A_0$ 。弦中间的平滑线形成一个新的内切圆如图 5 所示。

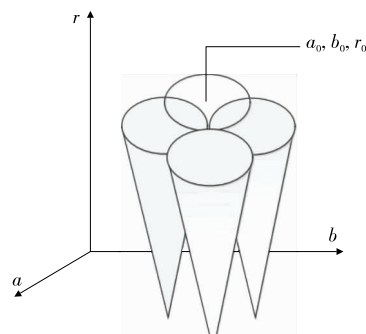


图 3 圆的 Hough 参数变换

Figure 3 Hough parameter transform of circle

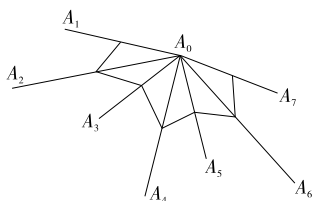


图 4  $A_0$  点的中点曲线

Figure 4 Midpoint curve of point  $A_0$

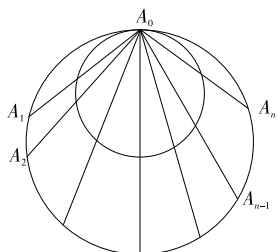


图 5  $A_0$  点的内切圆

Figure 5 Inscribed circle at point  $A_0$

基于弦中点 Hough 变换的检测原理: 在含有圆的二值图像中, 圆上点的内切圆与圆心相交, 在圆的中心, 必然有较多的内接圆, 而在其他位置, 中点曲线通过的次数要少得多, 原圆的内接圆如图 6 所示。

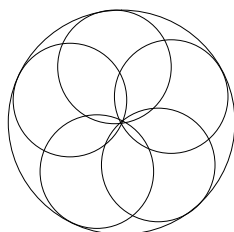


图 6 原圆的内切圆

Figure 6 Inscribed circle of original circle

圆的一般方程是:  $(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2$ , 包含 3 个自由参数。圆心坐标和对应的半径如式 (6) 和式 (7) 所示<sup>[15]</sup>。

$$\begin{cases} a = (x_1 + x_2) / 2 \\ b = (y_1 + y_2) / 2 \end{cases} \quad (6)$$

$$r = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} / 2, \quad (7)$$

式中:

$(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ ——特征点的坐标;

$(a, b)$ ——圆心坐标;

$r$ ——圆半径, mm。

因目标的半径不同, 设最大和最小半径分别为  $r_{\max}$  和  $r_{\min}$ , 通过式 (8) 对图像是否满足目标特征进行判断<sup>[16]</sup>。

$$\begin{cases} |x_1 - x_2| \leq 2r_{\max} \\ |y_1 - y_2| \leq 2r_{\max} \\ |x_1 - x_2| \geq \sqrt{2}r_{\min} \text{ 或 } |y_1 - y_2| \geq \sqrt{2}r_{\min} \end{cases} \quad (8)$$

最后, 显示图像。  $|(x-a)^2 + (y-2)^2 - r^2| \leq \epsilon$  圆环存在, 完成弦中点 Hough 变换圆检测。

通过视差获取目标的三维信息<sup>[17]</sup>。图 7 所示目标的识别和定位过程。目标物体图像库为分拣食品图像(包括 55 g 彩色果冻、70 g 和 210 g 番茄罐头)。

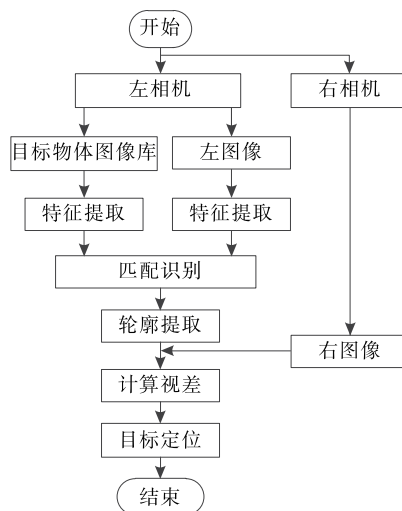


图 7 识别与定位流程

Figure 7 Identification and location process

### 2.3 抓取策略

Delta 机器人抓取时的运动轨迹大致为“门”型运动轨迹, 曲线如图 8 所示<sup>[18]</sup>。在每次抓取中, 将执行机构分为 3 个阶段: 上升  $P_1 P_2$ 、平移  $P_2 P_3$  和下降  $P_3 P_4$ <sup>[19]</sup>。然而, 两个角点处“门形”轨迹的加速度会阻碍轨迹的平滑过渡, 导致机器人振动, 这是降低运动精度的主要因素之一。

为了在伺服电机速度和扭矩不超过标定值的情况下保持 Delta 机器人连续平稳地移动, 文中选择五次多项式变换算法应用于机器人圆弧段的轨迹规划。

Delta 机器人的目标跟踪和抓取过程需要在确定抓取位置后不断调整和减小 Delta 机器人与目标之间的距离。

动态抓取过程只需在 XY 方向实时跟踪, 检测到目标后获取目标当前位置  $P$  和传送带的速度。机械手开始移动, 传送带仍在运行。在动态抓取过程中, 目标从一个

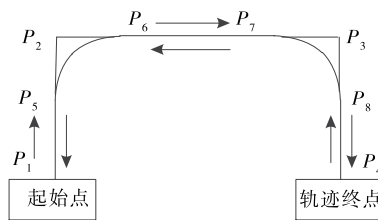


图 8 门字型轨迹曲线

Figure 8 Gate-shaped trajectory curve

点  $P$  移动到另一个点  $P'$ , 通过迭代算法获得 Delta 机器人与目标交点的  $Q$  点坐标。该系统采用 PID 算法对 Delta 机器人在  $X$  轴和  $Y$  轴上进行调节控制。详细的调整过程如图 9 所示。

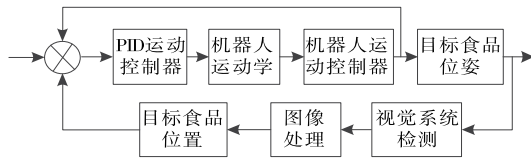


图 9 Delta 机器人 PID 跟踪控制

Figure 9 PID tracking control of Delta robot

在抓取过程中, 传送带与 Delta 机器人不断匹配, 需要不断减小两者之间的误差<sup>[20]</sup>。当 Delta 机器人的位置和速度与目标匹配时完成抓取。

### 3 结果与分析

#### 3.1 试验参数

为了验证所提出控制方法的有效性, 分别进行单目标和多目标抓取试验, 并与文献[21]中的控制方法进行比较。为了确保准确, 多次测试取平均值。测试设备为联想 PC, 操作系统为 windows 10 64 位旗舰, 英特尔 i5 2450m CPU, 2.5 GHz 主频, 8 GB 内存。相机采用 Basler 的 acA2500-14gc, 镜头采用 Basler 的 c125-1218-5m, 光源采用白色 LED 条形光源, 伺服电机采用松下 MSME202SGM, 伺服电机控制采用雷赛 smc64804 四轴运动控制器。试验参数见表 1。

表 1 试验参数

Table 1 Test parameters

设备	具体参数
试验目标	55 g 果冻、70 g 和 210 g 番茄罐头
机器人	三轴 Delta 机器人
分拣速率	120 次/min
机器人运动距离	500 mm
相机工作范围	550 mm
相机视场范围	236 mm×192 mm
传送带	速度可调
光源	380 mm×40 mm×30 mm

#### 3.2 试验分析

3.2.1 单一目标抓取 选择某食品厂生产的 55 g 彩色果冻进行分选试验, 并与文献[21]的方法进行比较。在测试过程中, 500 个果冻被随机放置在传输线上。Delta 机器人通过视觉系统的引导完成分拣工作。表 2 为不同方法的单一目标分拣试验结果。

从表2可以看出, 在不同的输送速度下, 试验方法具

表 2 不同方法单一目标分拣试验结果

Table 2 Single target sorting test results of different methods

算法	输送速度/ (mm · s <sup>-1</sup> )	输送食品 数/个	抓取食品 个数/个	抓取成 功率/%
文献[21]	120	500	495	99.0
	200	500	475	95.0
试验方法	120	500	500	100.0
	200	500	490	98.0

有最优的抓取成功率。当输送带速度从 120 mm/s 增加到 200 mm/s 时, 两种方法的抓取成功率降低, 文献[21]的方法抓取成功率从 99.0% 减少到 95.0%, 试验方法从 100.0% 减少到 98.0%。两种控制方法的对比分析表明, 试验方法提高了精度、稳定性和分拣效率, 能够满足单一目标分拣要求。

3.2.2 对多目标进行抓取 将某食品厂生产的 70 g 和 210 g 小包装番茄罐头用于分选试验, 并与文献[21]的方法进行比较。将 500 个罐子随机放置传输线上, 包括 380 罐 70 g 番茄罐头和 120 罐 210 g 番茄罐头。Delta 机器人在双目视觉系统的引导下, 将进入目标分拣区的番茄罐头按照规格分拣到相应的铝托盘上, 完成分拣操作。表 3 为不同方法的多目标分拣试验结果。

表 3 不同方法多目标分拣试验结果

Table 3 Test results of multi-objective sorting with different methods

算法	输送速度/ (mm · s <sup>-1</sup> )	输送食品 数/个	抓取食品 个数/个	抓取成 功率/%
文献[21]	120	500	465	93.0
	200	500	420	84.0
试验方法	120	500	487	97.4
	200	500	470	94.0

从表 3 可以看出, 在不同的输送速度下, 试验方法具有最优的抓取成功率。当输送带速度从 120 mm/s 增加到 200 mm/s 时, 两种方法的分拣成功率降低, 文献[21]的方法从 93.0% 降低到 84.0%, 试验方法从 97.4% 降低到 94.0%。这是因为试验方法在视觉系统的引导下, 能够准确地抓住目标物体的中心, 从而满足不同规格物体的分拣要求。在输送带速度为 120 mm/s 的试验过程中, 试验方法完成了 500 次抓取操作, 成功抓取 70 g 番茄罐头 375 次和 210 g 番茄罐头 112 次, 在抓取 210 g 罐头的过程中有 3 次掉落。在输送带速度为 200 mm/s 的试验过程中, 抓取了 70 g 番茄罐头 362 次和 210 g 番茄罐头 108 次。在抓取 210 g 罐头的过程中有 5 次掉落。经分

析是因为执行器的吸盘较小,在惯性的作用下掉落,通过更换吸盘该问题得到了解决。

## 4 结论

研究提出了一种基于双目视觉的 Delta 机器人柔性抓取方法。采用张正友标定方法对相机进行标定,通过弦中点 Hough 变换对目标进行识别和定位,根据 PID 跟踪抓取控制 Delta 机器人实现对动态目标的抓取。结果表明,该方法能够准确、快速、稳定地实现单一目标和多目标动态抓取,系统的动态抓取成功率在 94.0% 以上,满足机器人抓取的需要。试验对基于双目视觉的 Delta 机器人柔性抓取研究尚处于起步阶段,目前仅进行圆形食品的分拣试验,后续将进一步探索增加食品的种类以及复杂目标物的定位抓取。

### 参考文献

- [1] 卢荣胜, 史艳琼, 胡海兵. 机器人视觉三维成像技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(4): 9-27.  
LU Rong-sheng, SHI Yan-qiong, HU Hai-bing. Review of three-dimensional technology for robot vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(4): 9-27.
- [2] 张铮, 熊盛辉, 王孙强, 等. 基于机器视觉的香蕉果肉缺陷预测方法[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 150-154.  
ZHANG Zheng, XIONG Sheng-hui, WANG Sun-qiang, et al. Prediction method of banana pulp defects based on machine vision[J]. Food & Machinery, 2020, 36(7): 150-154.
- [3] 刘海龙, 张蕾, 吴海波. 基于双视觉引导的工业机器人立体定位技术的研究[J]. 电气自动化, 2021, 43(1): 116-118.  
LIU Hai-long, ZHANG Lei, WU Hai-bo. Research on stereo positioning technology of industrial robot based on dual vision guidance[J]. Electrical Automation, 2021, 43(1): 116-118.
- [4] 曾劲松, 薛文凯, 徐博凡, 等. 双目视觉引导机器人定位抓取技术的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019, 12(1): 131-137.  
ZENG Jin-song, XUE Wen-kai, XU Bo-fan, et al. Research on positioning and grasping technology of binocular vision guided robot[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019, 12(1): 131-137.
- [5] 林义忠, 陈旭. 基于机器视觉的机器人定位抓取的研究进展[J]. 自动化与仪器仪表, 2021, 11(3): 9-12.  
LIN Yi-zhong, CHEN Xu. Research progress of robot positioning and grasping based on machine vision[J]. Automation & Instrumentation, 2021, 11(3): 9-12.
- [6] 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, 38(1): 49-55.  
NI He-peng, LIU Ya-nan, ZHANG Cheng-rui, et al. Algorithm of delta robot sorting system based on machine vision[J]. Robot, 2016, 38(1): 49-55.
- [7] 赵小霞, 李志强. 基于 PLC 和机器视觉的水果自动分级系统研究[J]. 农机化研究, 2021, 12(8): 75-79.  
ZHAO Xiao-xia, LI Zhi-qiang. Research on automatic fruit grading system based on PLC and machine vision[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 12(8): 75-79.
- [8] 李雅倩. 并联机器人夹持机构串类水果夹取控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020: 27-29.  
LI Ya-qian. Research on the control of parallel robot clamping mechanism for serial fruit clamping[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020: 27-29.
- [9] JIA Zhi-wei, WANG Li-jun, ZHANG Jin-chuan, et al. High efficiency, low power-consumption DFB quantum cascade lasers without lateral regrowth[J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12(1): 88-95.
- [10] 郝琳, 张坤平. 基于并联机器人的食品分拣控制系统设计[J]. 食品工业, 2020, 41(4): 209-212.  
HAO Lin, ZHANG Kun-ping. Design of food sorting control system based on parallel robot[J]. The Food Industry, 2020, 41(4): 209-212.
- [11] 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.
- [12] 刘芳, 刘玉坤, 林森, 等. 基于改进型 YOLO 的复杂环境下番茄果实快速识别方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 229-237.  
LIU Fang, LIU Yu-kun, LIN Sen, et al. Rapid identification method of tomato fruit in complex environment based on improved YOLO[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 229-237.
- [13] 赵利平, 吴德刚. 融合 GA 的三点定位夜间苹果目标的识别算法研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5): 134-138.  
ZHAO Li-ping, WU De-gang. Research on recognition algorithm of three-point positioning night apple target based on GA [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(5): 134-138.
- [14] 朱建宝, 许志龙, 孙玉玮, 等. 基于 OpenPose 人体姿态识别的变电站危险行为检测[J]. 自动化与仪表, 2020, 35(2): 47-51.  
ZHU Jian-bao, XU Zhi-long, SUN Yu-wei, et al. Detection of dangerous behaviors in substations based on OpenPose human posture recognition[J]. Automation & Instrumentation, 2020, 35(2): 47-51.
- [15] 于文妍, 杨坤林. 四旋翼无人机串级模糊自适应 PID 控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2019, 12(1): 227-231.  
YU Wen-yan, YANG Kun-lin. Design of cascade fuzzy adaptive PID control system for four rotor unmanned aerial vehicle[J]. Mechanical Design & Manufacturing, 2019, 12(1): 227-231.
- [16] 陶浩, 李笑, 陈敏. 基于改进 ORB 特征的遥操作工程机器人双目视觉定位[J]. 测控技术, 2019, 38(7): 19-23.  
TAO Hao, LI Xiao, CHEN Min. Binocular vision localization of teleoperation engineering robot based on improved ORB feature[J]. Measurement & Control Technology, 2019, 38(7): 19-23.

(下转第 212 页)