

食品协作机器人动态目标抓取控制方法研究

Research on dynamic target grasping control method for food collaborative robot

程鹏飞¹ 刘明堂² 孙 晨³

CHENG Pengfei¹ LIU Mingtang² SUN Chen³

(1. 河南水利与环境职业学院, 河南 郑州 450000; 2. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450045;

3. 河南农业大学, 河南 郑州 450002)

(1. Henan Vocational College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou, Henan 450000, China;

2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450045, China;

3. Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China)

摘要:目的:解决目前协作机器人在食品动态目标抓取中存在的准确性较低问题。方法:基于协作机器人体系结构,提出将模糊自整定 PID 控制和鲁棒自适应补偿器相结合用于协作机器人食品动态目标抓取。PID 结合模糊控制完成参数自整定,鲁棒算法与自适应算法相结合用于系统不确定性补偿。通过试验分析了所提方法的性能,验证了该方法的可行性。结果:所提方法在协作机器人动态目标抓取中具有较好的效果,提高了协作机器人动态抓取的准确性,在传送带速度 100 mm/s 时,动态抓取成功率达到 99.50%,对食品动态目标抓取具有一定的应用价值。结论:通过优化现有目标抓取控制方法,可有效提高协作机器人的抓持精度。

关键词:协作机器人;动态目标抓取;模糊自整定 PID 控制;鲁棒自适应补偿器;抓取控制方法

Abstract: **Objective:** Solve the problem of low accuracy of collaborative robots in food dynamic target grasping at present. **Methods:** Based on the architecture of collaborative robots, a combination of fuzzy self-tuning PID control and robust adaptive compensator was proposed for collaborative robot food dynamic target grasping. PID combined with fuzzy control to achieve parameter self-tuning, and robust algorithm combined with adaptive algorithm for system uncertainty compensation. The performance of the proposed method was analyzed through experiments, verifying its feasibility. **Results:** The proposed method had good results in the dynamic target grasping of

collaborative robots, improving the accuracy of dynamic grasping. At a conveyor belt speed of 100 mm/s, the success rate of dynamic grasping reaches 99.50%, which had certain application value for food dynamic target grasping. **Conclusion:** By optimizing existing target grasping control methods, the grasping accuracy of collaborative robots can be effectively improved.

Keywords: collaborative robots; dynamic target capture; fuzzy self-tuning PID control; robust adaptive compensator; grab control method

在“工业 4.0”“再工业化”“中国制造 2025”等重大计划的推动下,中国机器人技术发展迅速^[1]。机器人作为集深度学习、智能控制和感知等多种人工智能技术于一体的技术,大大提高了生产效率,也使产品质量得到了进一步提高。食品行业需要在包装、分拣、装箱等方面投入大量工作,为了满足产品定制带来的多样性需求以及食品生产中快速换产要求,机器人不仅要长期执行重复性的工作任务,还需要考虑人与机器人协同工作的问题^[2]。协作机器人以体积小、人机互动性好、安全系数高等优点成为人机合作不可替代的领域。动态目标抓持是协作机器人最典型的应用之一,能够满足柔性灵活的抓持需求,提高抓持作业的精度和效率^[3]。

为了使机器人能够适应复杂的工作环境,机器人的智能化研究尤其是智能化抓取技术的研究越来越受到关注。目前国内外关于机器人抓取控制技术的研究较多,也有一些较为突出的成果,如 PID 控制、滑动控制、鲁棒控制等^[4-8]。但是关于协作机器人的抓取控制方法研究较少,与传统机器人相比,协作机器人更加安全和简单。李世裴等^[9]针对多目标复杂场景,提出将监督学习和视

基金项目:河南省高等学校重点科研项目计划(编号:23A413009)

作者简介:程鹏飞(1987—),男,河南水利与环境职业学院讲师,学士。E-mail:chenpfei3463@163.com

收稿日期:2023-09-19 **改回日期:**2023-12-17

觉技术相结合用于协作机器人抓取控制。结果表明,所提方法能够较为准确地抓取目标,具有一定的应用价值。胡国喜等^[10]针对并联机器人食品分选中存在的效率差和精度低等问题,提出一种改进的 PID 控制方法用于运动目标抓取。结果表明,所提方法与常规方法相比,在动态目标抓取中具有良好的抓取成功率和效率。饶期捷等^[11]针对现有机器人抓持方法不能满足实际生产需要,提出将改进的 Canny 边缘检测与 Hough 变换相结合用于机器人抓取检测。结果表明,所提方法在抓取过程中具有较好的准确率和鲁棒性。虽然上述方法可以实现机器人动态目标的稳定和高效抓取,但在实际应用中的抓取成功率和效率有待进一步提高。

在此基础上,研究提出将模糊自整定 PID 控制与鲁棒自适应补偿器相结合用于协作机器人食品动态目标抓取控制。通过 PID 结合模糊控制完成参数自整定,将鲁棒算法与自适应算法结合用于系统不确定性补偿,并通过试验验证所提方法的优越性。以期作为协作机器人在食品生产中的应用提供依据。

1 协作机器人系统概述

根据机械臂的结构,将机器人分为串联机械臂和并联机械臂,并联机械臂如 DELTA 机器人,串联机械臂如协作机器人和工业机器人等。协作机器人以其体积小、人机交互性好、安全系数高等优点被广泛应用于食品分选领域^[12-13]。图 1 为协作机器人的系统结构。该系统由主控制器、协作机器人主机、视觉系统、传输系统、显示系统 5 个主要部分组成。通过视觉系统实现传动系统上目标数据的采集与识别,主控制器根据采集信息对抓取位置进行计算,控制协作机器人本体完成目标物体的动态抓取。

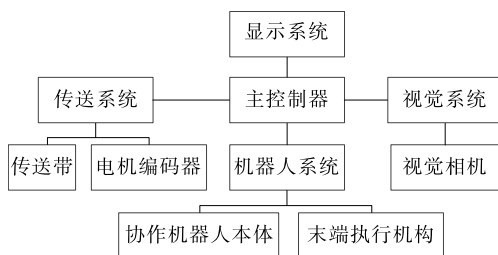


图 1 系统结构

Figure 1 System structure

2 协作机器人抓取控制

协作机器人由多个关节和连杆组成,是一个比较复杂的动力学系统,各关节的运动与力矩之间也存在复杂的耦合效应,在协作机器人运动过程中,外部干扰和不确定性是影响协作机器人的主要因素,不确定性与时间变化是未知的,提出将模糊自整定 PID 控制与鲁棒自适应

补偿器相结合用于协作机器人食品动态目标抓取。通过模糊控制器对 PID 控制参数进行自调整,通过结合鲁棒算法和自适应算法对系统的不确定性进行补偿^[14-18]。

2.1 协作机器人动力学方程

根据拉格朗日建模方法可以得到串联机械臂的动力学方程,如式(1)所示。

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau, \quad (1)$$

式中:

$M(q)$ ——机器人惯性矩阵;

$C(q, \dot{q})$ ——机器人离心力和科氏力项矩阵;

$G(q)$ ——机器人重力项, $N \cdot mm$;

$\ddot{q}$ ——关节角加速度, rad/s^2 ;

$\dot{q}$ ——关节角速度, rad/s ;

q ——关节角角度, rad ;

τ ——各关节驱动力矩, $N \cdot mm$ 。

式(1)为理想状态下机械臂各关节的驱动力矩,但实际控制对象会受到干扰和摩擦力的影响。当机器人关节角速度不为零时,关节所受的力矩可近似为受库仑摩擦力和黏性摩擦力的影响。动力学方程如式(2)所示。

$$M(q, \sigma, t)\ddot{q}(t) + C(q, \dot{q}, \sigma, t)\dot{q}(t) + G(q, \sigma, t) + F(\dot{q}, \sigma, t) = \tau(t), \quad (2)$$

式中:

$F(\dot{q}, \sigma, t)$ ——库仑摩擦力和黏性摩擦力组成的力矩(不考虑外力作用的关节力矩), $N \cdot mm$;

σ ——机械系统中的不确定参数;

$\tau(t)$ —— t 时刻各关节驱动力矩, $N \cdot mm$ 。

2.2 模糊 PID 控制

PID 控制在工业控制中应用较为广泛,常用的 PID 控制器具有比例项、积分项、微分项,输出如式(3)所示^[19]。

$$\tau_{pid} = k_p e(t) + \int k_i e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (3)$$

式中:

$e(t)$ ——跟踪误差, rad ;

k_p 、 k_i 、 k_d ——比例、积分和微分系数。

由于积分项导致定性下降和计算量增加,文中 $k_i = 0$, PID 控制输出如式(4)所示。

$$\tau_{pid} = k_p e(t) + k_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (4)$$

因 PID 参数调整较为复杂,在非线性时变系统中无法适用,因此,提出 PID 与模糊控制结合完成参数自整定,有效解决 PID 参数整定难度大的问题,具体参数整定过程如图 2 所示。

将误差 e 和变化率 Δe 作为模糊输入,将比例和微分增量 Δk_p 和 Δk_d 作为模糊输出,隶属函数为三角形。进而实现非线性 PID 控制的参数自整定功能。



图2 模糊PID控制器参数整定过程

Figure 2 Parameter tuning process of fuzzy PID controller

2.3 自适应鲁棒补偿器

为了对机械臂不确定性进行补偿,提出将鲁棒算法和自适应算法相结合用于系统不确定性补偿,使系统误差渐进收敛。设轨迹跟踪的期望轨迹为 q_d , 期望的角速度 $\dot{q}_d(t)$, 期望的角加速度 $\ddot{q}_d(t)$, 在给定的任意时间 $t \in (0, +\infty)$ 都有 $q_d(t)$ 、 $\dot{q}_d(t)$ 、 $\ddot{q}_d(t)$ 一致有界, 则轨迹跟踪的误差如式(5)~式(7)所示^[20]。

$$e(t) = q(t) - q_d(t), \quad (5)$$

$$\dot{e}(t) = \dot{q}(t) - \dot{q}_d(t), \quad (6)$$

$$\ddot{e}(t) = \ddot{q}(t) - \ddot{q}_d(t), \quad (7)$$

式中:

$e(t)$ ——跟踪角误差, rad;

$\dot{e}(t)$ ——跟踪角速度误差, rad/s;

$\ddot{e}(t)$ ——跟踪角加速度误差, rad/s²。

将式(5)、式(6)和式(7)代入式(2), 变换得:

$$M(q, \sigma, t)[\ddot{q}_d(t) + \ddot{e}(t)] + C(q, \dot{q}, \sigma, t)[\dot{q}(t) + \dot{e}(t)] + G(q, \sigma, t) + F(\dot{q}, \sigma, t) = \tau(t). \quad (8)$$

在机器人的实际运行过程中, 由于参数的不确定性和参数的不断变化以及机器人系统中存在的不确定性, 不能得到精确的动力学模型, 因此, 可以将动力学模型分为名义部分和不确定部分, 如式(9)所示。

$$\begin{cases} M(q, \sigma, t) = \bar{M}(q, t) + \Delta M(q, \sigma, t) \\ C(q, \dot{q}, \sigma, t) = \bar{C}(q, \dot{q}, t) + \Delta C(q, \dot{q}, \sigma, t) \\ G(q, \sigma, t) = \bar{G}(q, t) + \Delta G(q, \sigma, t) \\ F(\dot{q}, \sigma, t) = \bar{F}(\dot{q}, t) + \Delta F(\dot{q}, \sigma, t) \end{cases}, \quad (9)$$

式中:

$\bar{M}(q, t)$ 、 $\bar{C}(q, \dot{q}, t)$ —— t 时刻 $M(q)$ 、 $C(q, \dot{q})$ 的估计值;

$\bar{G}(q, t)$ 、 $\bar{F}(\dot{q}, t)$ —— t 时刻 $G(q)$ 和 $F(\dot{q})$ 的估计值, N·mm;

$\Delta M(q, \sigma, t)$ 、 $\Delta C(q, \dot{q}, \sigma, t)$ —— t 时刻 $M(q)$ 、 $C(q, \dot{q})$ 的变化量;

$\bar{G}(q, t)$ 、 $\bar{F}(\dot{q}, t)$ —— t 时刻 $G(q)$ 和 $F(q)$ 的变化量, N·mm。

将系统中不确定项用 $H(e, \dot{e}, \sigma, t)$ 表示, 得:

$$H(e, \dot{e}, \sigma, t) = -\Delta M(q, \sigma, t)(\ddot{q}_d - S\ddot{e}) - \Delta C(q, \dot{q}, \sigma, t)(\dot{q}_d - S\dot{e}) - \Delta G(q, \sigma, t) - \Delta F(\dot{q}, \sigma, t), \quad (10)$$

式中:

S ——常数。

如果不考虑所有的不确定性, 那么 $H \equiv 0$ 。

设计鲁棒补偿器如式(11)所示。

$$u_d = -\frac{\beta}{\beta \|\dot{q} - \dot{q}_d + \lambda(q - q_d)\| + \epsilon} [\dot{q} - \dot{q}_d + \lambda(q - q_d)], \quad (11)$$

式中:

λ ——对角矩阵, $\lambda = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$;

β ——系统不确定项上限 ($H \leq \beta$);

ϵ ——常数(极小);

u_d ——补偿器的实际输出。

β 参数满足如式(12)所示。

$$H \leq \beta = D \cdot B, \quad (12)$$

式中:

B ——系统不确定项;

D ——系数向量, $D = \max(1, \|e\|, \|\dot{e}\|^2)$ 。

通过自适应算法确定 B 参数估计律, 如式(13)所示。

$$\dot{B} = -kD \|\dot{q} - \dot{q}_d\|, \quad (13)$$

式中:

$\dot{B}$ ——参数 B 估计律;

k ——正定矩阵。

可得自适应的鲁棒补偿器如式(14)所示。

$$u = -\frac{(D\dot{B})^2}{(D\dot{B} \|\dot{q} - \dot{q}_d + \lambda(q - q_d)\| + \epsilon)} [\dot{q} - \dot{q}_d + \lambda(q - q_d)]. \quad (14)$$

2.3 控制策略

针对传统 PID 控制器存在的一些问题, 提出将模糊自整定 PID 控制与鲁棒自适应补偿器相结合用于协作机器人的食品动态目标抓取。通过模糊控制器对 PID 控制参数进行自整定, 提高效率的同时降低超调量。通过鲁棒自适应补偿器补偿系统的不确定性, 提高系统抗干扰和学习能力。具体的控制器结构如图 3 所示。

设计总控制律如式(15)所示。

$$\tau_{pid} + u = \tau. \quad (15)$$

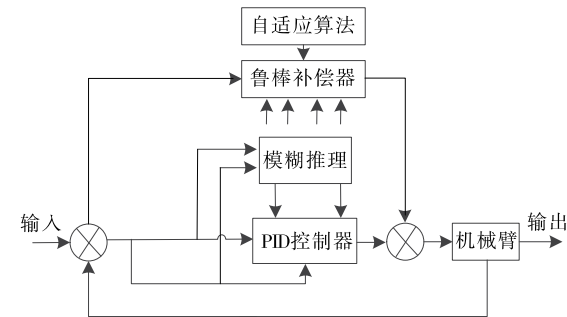


图 3 抓取控制方法结构

Figure 3 Structure of grab control method

3 试验分析

3.1 试验参数

为了验证所提协作机器人抓取控制方法的优越性，将试验方法与文献[21]结合滑模和模糊算法的控制方法和 PID 控制方法进行动力学轨迹跟踪和抓取效果试验。PC 机系统为 windows11、处理器为英特尔酷睿 i513400m。通过 MATLAB 进行试验。抓取平台结构如图 4 所示，系统参数见表 1。算法参数见表 2。

为了更好地对比不同控制方法的性能，通过最大位移误差(MAXE)和位移误差的均方根(RMSE)对不同控

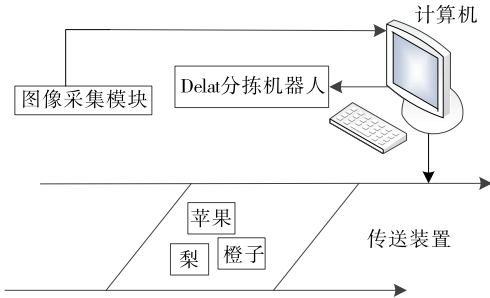


图 4 抓取平台结构

Figure 4 Grab platform structure

表 1 系统参数

Table 1 System parameter

设备	具体参数
试验目标	苹果(梨和橙子为干扰)
协作机器人	JAKAZu 3 协作机器人
协作机器人自重	12 kg
末端负载	3 kg
工作半径	626 mm
重复定位精度	±0.05 mm
相机	IntelRealSense D435 深度相机
主控制器	NVIDIAJetson AGX Xavier
传送带电机	东邦电机 5IK120RGU-CF
操作系统	ROS 操作系统

表 2 算法参数

Table 2 Algorithm parameters

算法	参数	值
模糊 PID 控制器	k_p	diag(100,100)
	k_d	diag(100,100)
鲁棒自适应控制器	k	10
	ϵ	[0.4, 0.9]
	λ	diag(2,2)

制方法的动态性能进行分析,如式(16)和式(17)所示。

$$E_{MAXE} = \max(|e_i|), \tag{16}$$

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}, \tag{17}$$

式中:

e_i ——第 i 个样本的位置跟踪误差,rad;

n ——样本总数。

3.2 不同控制方法试验对比分析

为了验证试验所提控制方法的优越性,将试验方法和文献[21]结合滑模和模糊算法的控制方法和 PID 控制方法进行对比分析,试验过程中对协作机器人上位机采集的数据进行处理,可以得到不同控制算法的对比结果,连杆 1 轨迹跟踪误差如图 5 所示,连杆 2 轨迹跟踪误差如图 6 所示。不同控制方法的跟踪性能比较如表 3 所示。

从图 5 和图 6 可以看出,与文献[21]的控制方法和 PID 控制方法相比,试验方法具有最小的跟踪误差,动态跟踪性能最优。由表 3 可知,试验所提控制方法在连杆 1 和连杆 2 中均具有最小的最大位移误差和位移误差的均方根,试验所提控制方法与 PID 控制算法和文献[21]控制方法相比均有较大提高,试验方法具有较好的鲁棒性,也验证了试验方法用于协作机器人抓取控制方法的优越性。

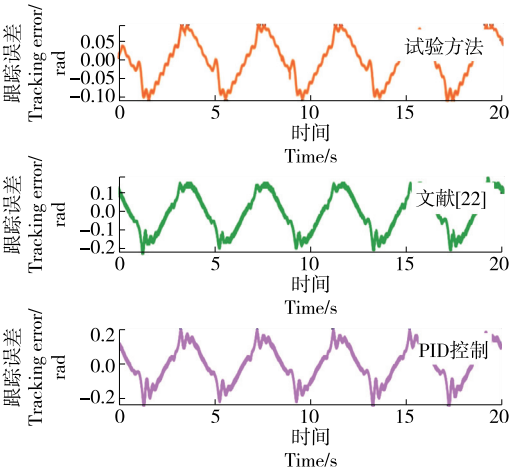


图 5 连杆 1 轨迹跟踪误差

Figure 5 Linkage 1 trajectory tracking error

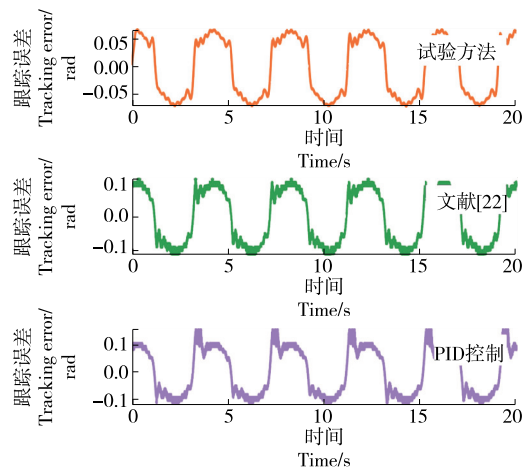


图 6 连杆 2 轨迹跟踪误差
Figure 6 Linkage 2 trajectory tracking error

表 3 不同方法的跟踪性能

Table 3 Tracking performance of different methods

方法	连杆	最大位移误差/rad	位移误差的均方根/rad
试验方法	1	0.150 0	0.050 8
	2	0.080 0	0.050 1
文献[21]	1	0.220 0	0.103 8
	2	0.100 0	0.060 8
PID 控制	1	0.240 0	0.112 0
	2	0.160 0	0.086 8

为了进一步验证试验所提控制方法的优越性,对协作机器人动态目标抓取系统的整体功能进行测试,测试系统能否有效、稳定地抓取和放置传送带上的目标物体,验证算法的稳定性。试验目标分别为苹果、梨和橙子,其中苹果为协作机器人抓取目标,梨和橙子为干扰对象,设置带式输送机 4 个速度(100,200,300,400 mm/s),苹果、梨和橙子各 2 000 个,不同抓取控制方法的抓取结果如表 4 所示。

由表 4 可知,输送速度从 100 mm/s 增加到 400 mm/s,3 种方法抓取成功率均有不同程度的降低,试验方法的抓取成功率由 100 mm/s 时的 99.50% 降至 400 mm/s 时的 94.50%;文献[21]方法的抓取成功率由 100 mm/s 时的 98.25% 降至 400 mm/s 时的 91.00%;PID 控制的抓持成功率由 100 mm/s 时的 95.00% 降至 400 mm/s 时的 79.50%,因此从动态目标抓取效果来看,试验方法在多种输送速度下抓取成功率最优,能够达到预期的协作机器人动态目标抓持效果,具有较强的抗干扰能力和适应性。

4 结论

研究提出将模糊自整定 PID 控制与鲁棒自适应补偿器相结合用于协作机器人食品动态目标抓取。PID 控制

表 4 不同方法的抓取效果

Table 4 Grasping effects of different methods

分拣控制策略	输送速度/(mm·s ⁻¹)	输送食品数/个	抓取食品数/个	抓取成功率/%
PID 控制	100	2 000	1 900	95.00
	200	2 000	1 840	92.00
	300	2 000	1 720	86.00
	400	2 000	1 590	79.50
文献[21]	100	2 000	1 965	98.25
	200	2 000	1 914	95.70
	300	2 000	1 872	93.60
	400	2 000	1 820	91.00
试验方法	100	2 000	1 990	99.50
	200	2 000	1 958	97.90
	300	2 000	1 912	95.60
	400	2 000	1 890	94.50

参数由模糊控制器自调整,并将鲁棒自适应算法用于补偿系统的不确定性。结果表明,与文献[21]方法和 PID 控制相比,从传送带速度为 100~400 mm/s 时,试验方法抓取成功率由 99.50% (PID 控制 95.00%, 文献[21] 98.25%) 仅降至 94.50% (PID 控制降为 79.50%, 文献[21]降为 91.00%),试验方法具有最高的抓取成功率,能够应对目标的变化和外部干扰,提高协作机器人的抓取成功率,对食品自动化生产具有一定的参考价值。虽然试验所提方法在食品动态目标抓取中的效果较好,但仍有一些研究需要不断完善,如后续可以进行多机器人协作,进一步提高抓取的成功率。

参考文献

[1] 吴高华, 杨依领, 李国平, 等. 具有高位移增幅特性的柔顺并联式微动平台[J]. 机器人, 2020, 42(1): 1-9.
WU G H, YANG Y L, LI G P, et al. Compliant parallel micro motion platform with high displacement and amplitude increase characteristics[J]. Robot, 2020, 42(1): 1-9.
[2] 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 H L, ZHANG L, WU H B. Research on stereo positioning technology of industrial robot based on dual vision guidance[J]. Electrical Automation, 2021, 43(1): 116-118.
[3] 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 J S, XUE W K, XU B F, et al. Research on positioning and grasping technology of binocular vision guided robot[J]. Modular Machine Tools & Automatic Machining Technology, 2019, 12(1): 131-137.

- [4] 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 Y Z, CHEN X. Research progress of robot positioning and grasping based on machine vision [J]. Automation and Instrumentation, 2021, 11(3): 9-12.
- [5] 贾超广, 肖海霞. 机器视觉的食品包装快速分拣系统[J]. 食品工业, 2021, 42(5): 276-279.
- JIA C G, XIAO H X. Rapid sorting system for food packaging based on machine vision[J]. Food Industry, 2021, 42(5): 276-279.
- [6] 王敏, 蒋金伟, 曹彦陶. 基于改进粒子群的食品分拣机器人动态目标抓取控制方法[J]. 食品与机械, 2022, 38(3): 86-91.
- WANG M, JIANG J W, CAO Y T. A dynamic target grasping control method for food sorting robot based on improved particle swarm optimization[J]. Food & Machinery, 2022, 38(3): 86-91.
- [7] 肖瑶星, 刘立新, 胡柳, 等. 基于三维模型的食品分拣机器人抓取控制方法[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 77-82, 162.
- XIAO Y X, LIU L X, HU L, et al. Grab control method for food sorting robot based on 3D model[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 77-82, 162.
- [8] 柳振宇, 薛毓强, 谢祖强. 基于闭环和前馈控制的高速食品分拣机器人控制技术[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 87-93.
- LIU Z Y, XUE Y Q, XIE Z Q. Control technology of high-speed food sorting robot based on closed-loop and feedforward control[J]. Food & Machinery, 2021, 37(7): 87-93.
- [9] 李世裴, 韩家哺, 路博凡, 等. 视觉引导下协作机器人抓取技术研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2022, 39(1): 42-48.
- LI S P, HAN J P, LU B F, et al. Research on visual guided collaborative robot grasping technology[J]. Journal of Chongqing Business University (Natural Science Edition), 2022, 39(1): 42-48.
- [10] 胡国喜, 王超, 刘宇珩. 基于改进光滑滑模阻抗控制的水果分拣机械人夹持机构控制方法[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 130-134.
- HU G X, WANG C, LIU Y H. A control method for fruit sorting robot clamping mechanism based on improved smooth sliding mode impedance control [J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 130-134.
- [11] 饶期捷, 黄海松, 张松松, 等. 基于机器视觉的 Baxter 机器人抓取算法研究[J]. 组合机床与自动化技术加工, 2021, 12(9): 1-5.
- RAO Q J, HUANG H S, ZHANG S S, et al. Research on baxter robot grab algorithm based on machine vision [J]. Modular Machine Tools & Automation Technology Processing, 2021, 12(9): 1-5.
- [12] 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 L P, WU D G. Research on recognition algorithm of three-point positioning night apple target based on GA [J]. China Agricultural Machinery Chemical Journal, 2020, 41(5): 134-138.
- [13] 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 J B, XU Z L, SUN Y W, et al. Detection of dangerous behaviors in substations based on OpenPose human posture recognition[J]. Automation and Instrumentation, 2020, 35(2): 47-51.
- [14] 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 W Y, YANG K L. Design of cascade fuzzy adaptive PID control system for four rotor UAV [J]. Mechanical Design & Manufacturing, 2019, 12(1): 227-231.
- [15] 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 H, LI X, CHEN M. binocular vision of teleoperation engineering robot based on improved orb feature[J]. Measurement and Control Technology, 2019, 38(7): 19-23.
- [16] 宋海涛, 何文浩, 原魁. 一种基于 SIFT 特征的机器人环境感知双目立体视觉系统[J]. 控制与决策, 2019, 34(7): 1 545-1 552.
- SONG H T, HE W H, YUAN K. A robot environment perception binocular stereo vision system based on SIFT feature[J]. Control and Decision, 2019, 34(7): 1 545-1 552.
- [17] 马伟革, 李文新, 孙晋川, 等. 基于粗一精立体匹配的双目视觉目标定位方法[J]. 计算机应用, 2020, 40(1): 227-232.
- MA W P, LI W X, SUN J C, et al. Binocular vision target location method based on coarse fine stereo matching [J]. Computer Applications, 2020, 40(1): 227-232.
- [18] 罗久飞, 邱广, 张毅, 等. 基于自适应双阈值的 SURF 双目视觉匹配算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 240-247.
- LUO J F, QIU G, ZHANG Y, et al. Research on SURF binocular vision matching algorithm based on adaptive double threshold[J]. Journal of Instrumentation, 2020, 41(3): 240-247.
- [19] 程禹, 王晓华, 王文杰, 等. 基于改进 AKAZE 算法的图像特征匹配方法[J]. 西安工程大学学报, 2020, 34(8): 51-56.
- CHENG Y, WANG X H, WANG W J, et al. Image feature matching method based on improved AKAZE algorithm[J]. Journal of Xi'an Engineering University, 2020, 34(8): 51-56.
- [20] 苏婷婷, 张好剑, 王云宽, 等. 基于费拉里法的 Delta 机器人动态目标抓取算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 128-132.
- SU T T, ZHANG H J, WANG Y K, et al. Delta robot dynamic target grasping algorithm based on Ferrari method[J]. Journal of Huazhong University of science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(6): 128-132.
- [21] 陶永, 兰江波, 刘海涛, 等. 基于滑模和模糊算法相融合的人机协作机器人轨迹跟踪方法[J]. 机械工程学报, 2022, 58(18): 181-191.
- TAO Y, LAN J B, LIU H T, et al. A trajectory tracking method for human-machine collaborative robots based on the fusion of sliding mode and fuzzy algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(18): 181-191.