DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2021.07.014

基于闭环和前馈控制的高速食品 分拣机器人控制技术

Control technology of high speed food sorting robot based on closed loop and feedforward control

柳振宇1 薛毓强2 谢祖强3

LIU Zhen-yu¹ XUE Yu-qiang² XIE Zu-qiang³
 (1. 福州第二技师学院,福建 福州 350000;2. 福州大学,福建 福州 350000;
 3. 福建船政交通职业学院,福建 福州 350000)

(1. Fuzhou Second Technician College, Fuzhou, Fujian 350000, China; 2. Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350000, China; 3. Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou, Fujian 350000, China)

摘要:目的:满足当前对食品分拣机器人速度和精度的需 求。方法:基于高速并联食品分拣机器人的系统体系结 构,提出一种将传统的运动学闭环控制和力矩前馈控制 相结合的高速并联食品分拣机器人控制方法;在原有遗 传算法整定 PID 控制参数的基础上,引入力矩前馈控制 方法进行动态控制;对比分析系统的动态跟踪精度和关 节力矩,并验证该控制方法的优越性。结果:与传统 PID 控制相比,最大和平均关节位置跟踪误差降低了 65%以 上,最大轨迹误差降低了 50%以上。结论:该控制方法可 以有效提高高速运行时抑制动态干扰的能力。

关键词:分拣机器人;运动学闭环控制;力矩前馈控制; PID 控制;遗传算法;动态跟踪精度;高速

Abstract: Objective: in view of the current situation that the food sorting robot has higher and higher requirements for speed and precision. Methods: Based on the system architecture of highspeed parallel food sorting robot, a control method of high-speed parallel food sorting robot is proposed, which combines the traditional closed-loop control of kinematics with the feedforward control of torque; Based on the original genetic algorithm tuning PID control parameters, the torque feedforward control method is introduced for dynamic control; The dynamic tracking accuracy and joint torque of the system are compared and analyzed, and the superiority of the control method is verified. **Results**; compared with the traditional PID control, the maximum and average joint position tracking error is reduced by more than 65%, and the maxi-

通信作者:薛毓强(1962—),男,福州大学教授,硕士。

E-mail:xuelq01@126.com

收稿日期:2021-02-18

mum trajectory error is reduced by more than 50%. **Conclusion**: The dynamic disturbance can be suppressed significantly under the control method when the sorting robot works at high speed. **Keywords**: sorting robot; kinematics closed loop control; torque feedforward control; PID control; genetic algorithm; dynamic tracking accuracy; high speed

在食品和药品等轻工业中,通常需要高速完成诸如包装 和分拣等操作,其操作对象具有重量轻、体积小等特点^[1]。 高速并联分拣机器人具有刚度质量比大、无累积误差、移动 速度高等优点,被广泛用于食品和制药等轻工业^[2]。

目前,有关食品分拣机器人的相关技术研究较多,但 对高速并联食品分拣机器人的研究较少。史亚贝[3]提出 了一种基于 DSP 的三自由度分拣机器人控制系统,从硬 件和软件两方面构建了一个系统平台。结果表明,在控 制系统的驱动控制下,分拣机器人可以准确地从起点移 动到终点,轨迹相对平滑,可以达到预期的目标。伍经纹 等^[4]提出了一种基于 ADAMS 的三自由度增量机械手运 动学分析方法,建立了机械手的数学模型,使用改进的修 正梯形加速度曲线来消除运动始末端对机械手的影响。 朱向楠等^[5]提出了一种基于模糊 PID+前馈控制的并联 机器人控制方法,并通过仿真验证了其运动位移和角位 移误差。结果表明,改进后的控制方法在二自由度并联 机器人的运动位移和角位移跟踪误差较小,提高了并联 机器人的跟踪精度。张皓宇等[6]对并行机器人的运动控 制和 NURBS 轨迹进行了研究,使用解析方法解决了并行 机器人的逆运动学问题,并提出了一种基于多层感知器 进行反向传播学习的神经网络实时求解正运动学问题。 结果表明,在迭代次数和执行时间较少的情况下,位置和 方向参数的精度均为 0.01 mm。但是,上述研究尚未对

基金项目:福建省教育厅科技项目(编号:JAT170957) 作者简介:柳振宇,男,福州第二技师学院高级讲师,硕士。

高速并行分拣机器人的控制方法进行详细研究,并且未 考虑诸如外部干扰等不确定因素对系统的影响,有一定 的局限性,需不断改进和完善。

针对高速并联食品分拣机器人的控制方法,文章拟 提出一种将传统运动学闭环控制和力矩前馈控制相结合 的高速并联食品分拣机器人的控制方法,在原有遗传算 法整定 PID 控制参数的基础上,引入力矩前馈控制方法 进行控制,并进行验证实验,旨在为研究高速并联食品分 拣机器人的控制方法提供依据。

1 系统概述

图 1 为高速并联食品分拣机器人的体系结构,主要 由上位机系统和下位机系统两个部分组成^[7]。上位机系 统是集成到工业计算机平台中的一组软件系统,其主要 功能包括可视化、模型求解、视觉处理、数据集成处理以 及与下位机的信息交互^[8]。下位机系统(即以主控制芯 片为核心的嵌入式软件和硬件系统)主要提供控制算法 集成、伺服电机闭环控制、实时监控和与上位机的实时数 据交互等功能。

图 2 为高速并联食品分拣机器人的本体,由静平台、 动平台、主动臂和从动臂 4 部分组成^[9]。静平台配备有 通过法兰连接的伺服电机和减速器,从动臂通过球形铰 链连接到动平台,每个分支链包含一个主动臂和一个从 动臂,动平台由主、辅平台组成^[10]。

2 建模与控制方法

高速并行分拣机器人机械部分建模分为运动学和动

力学两个部分^[11]。运动学分析,尤其是逆解分析,是对分 拣机器人进行控制的基础。动态分析是求解关节力矩和 实现动态控制的基础。

2.1 运动学模型

分拣机器人的动平台只进行平移运动,且各支链从 动臂的运动相同,因此可以将研究转化为分拣机器人结 构简图(见图 3)。

在静平台中心建立参考坐标系 O-*xyz*,将动平台看 成质点 P_1 和 P_2 ,则主(辅)动平台参考点 $P_1(P_2)$ 的位置 矢量 $r = (x - y - z)^T$ 如式(1)所示^[12]。

$$r + \varepsilon_i s \hat{z} = e_i + l_1 u_i + l_2 w_i, i = 1 \sim 4,$$
 (1)

 式中:
 (1)

 $e_i - - M O \supseteq A_i$ 的向量;
 (1)

 $l_1 - - \pm 动臂杆长, mm;$
 (1)

 $u_i - - \Phi \oplus \xi \equiv (B \pm \partial B^i);$
 (1)

 $l_2 - - M \partial B^i F K, mm;$
 (1)

 $w_i - - \Phi \oplus \xi \equiv (B \oplus A^i);$
 (1)

 $s - - P_1 \supseteq P_2$ 的距离, mm;
 (2)

 $\varepsilon_i = \begin{cases} 0, i = 1, 3 \\ 1, i = 2, 4^\circ \end{cases}$
 (2)

根据机构的装配模式,主动臂的转角 θ_i 整理如式(2) 所示^[13]。

$$\theta_i = 2 \arctan \frac{-E_i - \sqrt{E_i^2 - G_i^2 + F_i^2}}{G_i + F_i}, i = 1 \sim 4, \quad (2)$$

式中:

$$E_i = 2l_1 (r + \epsilon_i s \hat{z} - e_i)^T \hat{z};$$



Figure 1 System structure



静平台 2. 主动臂 3. 从动臂 4. 动平台
 图 2 并联机器人本体

Figure 2 Parallel robot body





Figure 3 Structure diagram of sorting robot

$$F_{i} = -2l_{1} (r + \varepsilon_{i}s\hat{z} - e_{i})^{T} (\cos\beta_{i}\hat{x} + \sin\beta_{i}\hat{y});$$

$$G_{i} = (r + \varepsilon_{i}s\hat{z} - e_{i})^{T} (r + \varepsilon_{i}s\hat{z} - e_{i}) + l_{1}^{2} - l_{2}^{2};$$

 \hat{x} 、 \hat{y} 、 \hat{z} ——坐标系 O-xyz 中单位矢量(沿各坐标轴)。

根据式(2)求解 θ_i 后, w_i 的值如式(3)所示^[14]:

$$\boldsymbol{w}_i = \frac{1}{l_2} (r + \varepsilon s_i \hat{\boldsymbol{z}} - \boldsymbol{e}_i - l_i \boldsymbol{u}_i)_{\circ}$$
(3)

将式(1)关于时间求一次导数得到速度模型如式(4) 所示^[15]。

$$\boldsymbol{J}_{q}\boldsymbol{\theta}^{g} = \boldsymbol{J}_{x}x^{g}, \qquad (4)$$

式中:

将式(1)关于时间求二次导数得到角加速度模型如

式(5)所示[16]。

$$\theta^{gg} = \mathbf{J} x^{gg} + f(x^{g}), \qquad (5)$$

$$\overrightarrow{\mathbf{x}} \ \overrightarrow{\mathbf{h}} :$$

$$f = (f_{1} \quad f_{2} \quad f_{3} \quad f_{4})^{T};$$

$$f_{i} = \frac{(L_{i}x^{g})^{T}}{l_{1}} H_{i} \frac{L_{i}x^{g}}{l_{1}};$$

$$H_{i} = \frac{1}{w_{i}^{T}(v_{i} \times u_{i})} \frac{1}{[w_{i}^{T}(v_{i} \times u_{i})]^{2}} (v_{i} \times w_{i})^{T} (v_{i} \times u_{i}) w_{i} w_{i}^{T} + \frac{l_{1}}{l_{2}} [E_{3} - \frac{1}{w_{i}^{T}(v_{i} \times u_{i})} (v_{i} \times u_{i}) w_{i}^{T}]^{T} [E_{3} - \frac{1}{w_{i}^{T}(v_{i} \times u_{i})} (v_{i} \times u_{i}) w_{i}^{T}]^{T}]_{\circ}$$

2.2 动力学模型

在完成刚体动力学建模前,应将整个食品分拣机器 人视为刚性的,忽略分拣机器人的摩擦,并且应将分拣机 器人的主臂和从属臂视为匀质杆件^[17]。

参考食品分拣机器人的结构图(图 3),在第 i 个支链的从动臂链接上建立坐标系 O_{bi} - $x_{bi}y_{bi}z_{bi}$,其中,原点 O_{bi} 在分拣机器人的每个支链的质心上, z_{bi} 轴的正方向是连杆轴线的方向,垂直于 x_{bi} 轴,且在 w_i 与 $w_i \times u_i$ 平面中,根据右手定则确定 y_{bi} 轴方向。并依据虚功原理,如式(6)所示^[18]。

$$(-m_{1}r^{gg} - m_{1}\hat{gz})^{T}\delta r + (-m_{2}(r^{gg} - s^{gg}\hat{z}) - m_{2}\hat{gz})^{T}\delta (r + s\hat{z}) + (-Is\theta^{gg}_{s}\hat{z})\delta\theta_{s}\hat{z} + (\tau - I'_{A}\theta^{gg} - \tau_{Ag})^{T}\delta\theta - \sum_{i=1}^{4}(\delta\omega^{T}_{i}M_{rodi} + \delta r^{T}_{di}(G_{rod} + A_{rod})) = 0, \quad (6)$$

$$\vec{x} \oplus :$$

 τ ——主动关节驱动转矩, $\tau = (\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3 \quad \tau_4)^T$; r^{ss} ——动平台质心加速度, $r^{ss} = (x^{ss} \quad y^{ss}$

 $z^{gg})^{T}$;

*m*₁、*m*₂——主平台和辅平台质量,kg;

$$I_{A}$$
——主动臂折算到转轴的转动惯量,kg•m²;

τ_{Ag}——主动臂关于转轴的重力矩,N•m;

G_{rod}——从动臂连杆的重力,N;

A_{rod}——从动臂连杆的惯性力,N;

M_{rod}──从动臂连杆的惯性力矩,N•m。

将虚位移 δθ=Jδr 代人式(6),可得食品分拣机器人 刚体动力学模型如式(7)所示。

$$\tau = \tau_{\Lambda} + \tau_{p} + \tau_{rod}, \qquad (7)$$

$$\vec{x} + :$$

τ_A、τ_{rod}、τ_p——作用在主动臂、从动臂、动平台与负载上的力与力矩;

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{\mathrm{A}} &= \boldsymbol{I}_{\mathrm{A}} \boldsymbol{\theta}^{\mathrm{gg}} + \boldsymbol{\tau}_{\mathrm{Ag}}; \\ \boldsymbol{\tau}_{\mathrm{p}} &= \boldsymbol{J}^{-T} \sum_{i=1}^{4} \left(\boldsymbol{J}_{\omega i}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{M}_{\mathrm{rod}} + \boldsymbol{J}_{\upsilon i}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{G}_{\mathrm{rod}} + \boldsymbol{J}_{\upsilon i}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{A}_{\mathrm{rod}} \right); \\ \boldsymbol{\tau}_{\mathrm{p}} &= \boldsymbol{J}^{-T} \left(\boldsymbol{m}_{\mathrm{a}} \boldsymbol{r}^{\mathrm{gg}} + \boldsymbol{m}_{\mathrm{g}} \boldsymbol{g} \right). \end{aligned}$$

2.3 控制方法

确保高速并联食品分拣机器人准确运行的最基本方法是制定控制方法,控制中需要解决的是建模和参数的不确定性^[19]。建模不确定性无法排除,只能不断提高控制器的鲁棒性,而参数的不确定性可以通过自整定来克服。

为了提高高速并联分拣机器人分拣的快速性和抗干扰能力,提出一种基于遗传算法自整定的 PID+前馈运动 控制方法,即在原有遗传算法整定 PID 控制参数的基础 上,引入力矩前馈控制方法进行动态控制,与反馈控制一 起作用至电机轴上^[20]。

通过遗传算法对食品分拣机器人的 PID 参数进行整 定时,有必要建立评价指标,以确保调整过程的合理性和 准确性。文中,时间与绝对误差乘积的积分作为评价指 标,即:

$$I_{\text{TAE}} = \int_{0}^{T} t \left| r(t) - y(t) \right| dt^{[21]}.$$
 (8)

表1为遗传算法进行整定后,速度环和位置环 PID 参数的最优解。

高速并联食品分拣机器人的实际操作状态通常是高速且频繁的加/减速,会导致多支链相互作用和惯性力 (如科氏力、向心力)的干扰越大,传统的 PID 控制无法满 足系统的快速响应^[22]。因此,在传统运动学闭环控制的 基础上,引入力矩前馈控制方法进行补偿,抵消分支链耦 合和动态力对系统控制的部分影响。

运动学闭环控制系统虽然具有一定的抗干扰功能, 但无法保证高速分拣机器人控制系统的准确性,引入力

	Table 1	Optimal pa	rameters		
速度环		位置环			
山甸榆光	积分时	比例增益	积分时	微分时	
比例增益	间常数		间常数	间常数	
731.0	5.12	31.3	1.59	0.80	

表1 最优参数

矩前馈控制方法后,系统可以实时求解变量的动态模型, 获得期望力矩并执行力矩前馈补偿。由于电流环采取封 装形式,通常不对用户开放。因此,力矩前馈补偿的作用 点基本会在电流环路之前。相对而言,力矩前馈具有系 统性和互补性优势,能有效改善系统动态性能。建模误 差和摩擦的影响由可闭环控制消除。图4为力矩前馈控 制框图。

其原理是:使用先前建立的动力学模型来计算操作 期间分拣机器人的位置和方向的变化,以获得此时的期 望力矩。通过分拣机器人的单链力矩前馈控制器,所需 力矩被转换为电信号,该信号作用在电流回路上,以实时 抑制高速动态干扰。通常情况下,分拣机器人的运动轨 迹是相对固定的,可以使分拣机器人的各种状态进行离 线求解,并通过查表来获得驱动扭矩,从而大大减少在线 操作量。力矩前馈控制环节的传递函数 G_{TF}为:

$$G_{\rm TF} = \frac{JLT_{\rm ii}s^2 + JT_{\rm ii}R + K_{\rm pi}s + JK_{\rm pi} + K_{\rm e}K_{\rm t}T_{\rm ii}}{JK_{\rm pi}K_{\rm t}T_{\rm ii}s + JK_{\rm pi}K_{\rm t}} \,.$$

(9)

3 结果与分析

3.1 试验参数

为了对所提出的控制方法进行验证,将所提出的控制方法与常规 PID 控制方法和常规 PID+前馈控制方法 进行比较。为了确保试验结果的准确性,通过多次测量 取 平 均 值。表 2 为 试 验 环 境,使 用 型 号 为 B7104Q3H7GKM00T5 的 LAFERT 电机,Intel i5 处理器 计算机,内存 8 G,win10 系统,控制平台由运动控制软件 TwinCAT 构建。

3.2 不同控制方法对比分析

将文中控制方法与传统的 PID 控制方法以及传统的 PID+前馈控制方法进行比较。通过从站的伺服驱动器 获得分拣机器人电机编码器的关节位置,比较分拣机器 人的4个关节的指令位置与实际位置,并对差值进行数 据处理。图5为分拣机器人采用不同控制方法的4个驱



图 4 力矩前馈控制模型 Figure 4 Torque feedforward control model

Table 2

Table 2	Experimental parameters
参数	数值
运动规律	5次B样条
运动轨迹	$25 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$
轨迹与 X 轴夹角	45°
采样周期	0.5 ms
完成一次抓取时间	0.277 s

试验参数 表 2



柳振宇等:基于闭环和前馈控制的高速食品分拣机器人控制技术

动关节的位置跟踪误差,不同控制方法下各轴位置跟随 误差的绝对值最大值和平均值见表 3。

由图 5 和表 3 可知,相比于传统的 PID 控制方法,加 入前馈控制方法后可将最大和平均关节位置跟踪误差降 低超过35%。加入自整定和前馈控制的方法最大和平均 位置跟踪误差降低超过 65%,极大地提高了各关节的跟 踪能力,从而实现了分拣机器人的高精度控制。图6为 3种控制方法下分拣机器人末端执行器在工作空间中的 轨迹误差比较,由关节位置正向运动学正解得到。



不同控制方法的空间跟随误差对比 图 5

Figure 5 Comparison of space following errors of different control methods

表 3 不同控制方法位置跟随误差最大值和平均值

Maximum and average position following error of different control methods Table 3

跟随误差/	传统 PID		传统 PID+前馈		文中控制方法	
(10^{-4} rad)	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
轴 1	4.69	1.86	2.93	1.16	1.29	0.51
轴 2	5.33	2.01	3.39	1.27	1.73	0.65
轴 3	4.73	1.89	2.95	1.17	1.42	0.55
轴 4	5.21	1.98	3.31	1.25	1.69	0.64



图 6 不同控制方法轨迹误差对比



由图 6 可知,传统 PID 控制方法最大轨迹误差为 0.192 mm,使用传统的 PID+前馈控制方法的最大轨迹 误差为 0.143 mm,降低了 25.52%;使用遗传算法优化的 PID+前馈控制方法的最大轨迹误差为 0.094 mm,降低 了 51.04%。

综上,通过前馈控制可以提高系统控制精度,但无法 解决系统模型误差,因此通过自适应整定可以进一步提 高控制精度,而遗传规则正好满足此要求。通过动态前 馈补偿和遗传优化的 PID 反馈调节相结合可以有效提高 系统的控制精度。为了进一步验证文中控制方法的有效

且峰值与趋势基本相同,证实了文中控制方法的有效性。 对误差产生的原因进行分析,可能是由模型参数误差、环

性,对控制关节的实测转矩和理论转矩进行进一步比较, 结果如图 7 所示。

由图7可知,实测力矩曲线与理论值曲线非常接近,



境噪音等引起的。

图 7 关节实测力矩与理论值对比 Figure 7 Comparison of measured and theoretical joint torque

4 结论

提出了一种将传统的闭环运动学控制和力矩前馈控 制相结合的高速并联食品分拣机器人控制方法。在原有 遗传算法整定 PID 控制参数的基础上,通过力矩前馈控 制方法进行动态控制。结果表明,与传统的 PID 控制相 比,关节位置跟踪最大和平均误差降低超过 65%,最大轨 迹误差降低超过 50%,极大地提高了高速并联食品分拣 机器人各关节的跟踪能力,实现了各关节的高精度控制。 高速并联食品分拣机器人的控制方法仍处于试验阶段, 文中仅对跟踪精度和关节转矩进行比较和分析,未对加 速度变化和负载变化进行研究,后续将注重提高控制系 统性能,完善高速并联食品分拣机器人系统。

参考文献

[1] 赵利平, 吴德刚. 基于小波与模糊相融合的苹果分级算法[J].
 食品与机械, 2020, 36(4): 142-145.

ZHAO Li-ping, WU De-gang. Apple grading algorithm based on wavelet and fuzzy fusion [J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 142-145.

[2] 项辉宇, 薛真, 冷崇杰, 等. 基于 Halcon 的苹果品质视觉检测试 验研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 123-126.

XIANG Hui-yu, XUE Zhen, LENG Chong-jie, et al. Experimental study on visual inspection of apple quality based on Halcon[J]. Food & Machinery, 2016, 32(10): 123-126.

[3] 史亚贝. 基于 DSP 的三自由度采摘机械手控制系统研究[J]. 农 机化研究, 2022, 12(2): 34-38. SHI Ya-bei. Research on control system of 3-DOF picking manipulator based on DSP[J]. Agricultural Mechanization Research, 2022, 12(2): 34-38.

- [4] 伍经纹, 徐世许, 王鹏, 等. 基于 Adams 的三自由度 Delta 机械 手的运动学仿真分析[J]. 软件, 2017, 38(6): 108-112.
 WU Jing-wen, XU Shi-xu, WANG Peng, et al. Kinematics simulation analysis of 3-DOF delta manipulator based on ADAMS[J]. Software, 2017, 38(6): 108-112.
- [5] 朱向楠, 韦源源. 基于位置姿势控制的并联机械手运动误差仿 真分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, 12(3): 49-56. ZHU Xiang-nan, WEI Yuan-yuan. Simulation analysis of motion error of parallel manipulator based on position and posture control[J]. Modular machine tool and automatic machining technology, 2021, 12(3): 49-56.
- [6] 张皓宇, 刘晓伟, 任川, 等. 并联机器人正运动学与 NURBS 轨 迹规划[J]. 机械设计与制造, 2021, 12(4): 282-292.
 ZHANG Hao-yu, LIU Xiao-wei, REN Chuan, et al. Forward kinematics and NURBS trajectory planning of parallel robot[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2021, 12(4): 282-292.
- [7] 董腾,秦腾飞,张如如,等. 基于机器视觉的水果分拣系统[J]. 聊 城大学学报(自然科学版), 2017, 30(1): 93-96.
 DONG Teng, QIN Teng-fei, ZHANG Ru-ru, et al. Fruit sorting system based on machine vision[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2017, 30(1): 93-96.
- [8]周伟,徐颖若.基于 PLC 和图像处理的水果分类智能控制系统[J]. 农机化研究, 2021, 12(5): 235-239.
 ZHOU Wei, XU Ying-ruo. Intelligent control system of fruit classification based on PLC and image processing[J]. Agricultural Mech-

anization Research, 2021, 12(5): 235-239.

[9] 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]. Agricultural Mechanization Research, 2021, 12 (8): 75-79.

[10] 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.

[11] 杨双艳,杨紫刚,张四伟,等.基于近红外光谱和 PSO-SVM 算法的烟叶自动分级方法 [J].贵州农业科学,2018,46(12): 141-144.

YANG Shuang-yan, YANG Zi-gang, ZHANG Si-wei, et al. Automatic tobacco grading method based on near infrared spectroscopy and PSO-SVM algorithm[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2018, 46(12): 141-144.

- [12] 王阳阳,黄勋,陈浩,等.基于同态滤波和改进 K-means 的苹果 分级算法研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(12): 47-51, 112.
 WANG Yang-yang, HUANG Xun, CHEN Hao, et al. Apple grading algorithm based on homomorphic filtering and improved K-means[J].
 Food & Machinery, 2019, 35(12): 47-51, 112.
- [13] 王立扬,张瑜,沈群,等. 基于改进型 LeNet-5 的苹果自动分级 方法[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(7): 105-110.
 WANG Li-yang, ZHAN Yu, SHEN Qun, et al. Automatic Apple classification method based on improvedlenet-5[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanochemistry, 2020, 41(7): 105-110.

[14] 于蒙,李雄,杨海潮,等. 基于图像识别的苹果的等级分级研究[J]. 自动化与仪表, 2019, 34(7): 39-43.
YU Meng, LI Xiong, YANG Hai-chao, et al. Apple grading based on image recognition[J]. Automation and Instrumentation, 2019, 34 (7): 39-43.

[15] 樊泽泽, 柳倩, 柴洁玮, 等. 基于颜色与果径特征的苹果树果 实检测与分级[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(9): 1 599-1 607.

[10] 徐德兵,陈福,张林涛,等. 云南高原山地油茶籽油脂肪酸组成及品质分析[J]. 西部林业科学, 2021, 50(1): 112-117.
XU De-bing, CHEN Fu, ZHANG Lin-tao, et al. Fatty acid composition and quality analysis of camellia oil in Yunnan Plateau[J].
Western Forestry Science, 2021, 50(1): 112-117.

[11] 高海东,高火亮,尹红娜,等.基于标准指纹图谱和特征脂肪 酸含量的植物调和油组成分析[J].现代食品科技,2020,36(6): 310-320.

GAO Hai-dong, GAO Huo-liang, YIN Hong-na, et al. Composition analysis of vegetable blended oil based on standard fingerprint and characteristic fatty acid[J]. Modern Food Technology, 2020, 36(6): 310-320. FAN Ze-ze, LIU Qian, CHAI Jie-wei, et al. Apple fruit detection and grading based on color and fruit diameter characteristics[J]. Computer Engineering and Science, 2020, 42(9): 1 599-1 607.

[16] 王冉冉, 刘鑫, 尹孟, 等. 面向苹果硬度检测仪的声振信号激励与采集系统设计[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(1): 111-118.

WANG Ran-ran, LIU Xin, YIN Meng, et al. Design of acoustic vibration signal excitation and acquisition system for Apple hardness tester[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences Edition), 2020, 46(1): 111-118.

[17] 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 quadrotor UAV[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2019, 12(1): 227-231.

- [18] 张树生, 马静雅, 岑强, 等. 煤矿综采工作面巡检机器人系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 136-140.
 ZHANG Shu-sheng, MA Jing-ya, CEN Qiang, et al. Research on inspection robot system of fully mechanized coal mining face[J].
 Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 136-140.
- [19] 王志中. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划研究[J]. 机械设计与制造, 2018, 12(1): 242-244.
 WANG Zhi-zhong. Research on mobile robot path planning based on improved ant colony algorithm [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2018, 12(1): 242-244.
- [20] GAUTAM J V, PRAJAPATI H B, DABHI V K, et al. Empirical study of job scheduling algorithms in hadoop map reduce[J]. Cybernetics and Information Technologies, 2017, 21(1): 146-163.
- [21] CAETANO C E F, LIMA A B, PAULINO J O S, et al. A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 46 (5): 159-162.
- [22] 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.
- [12] MA Jin-lin, YE Hang, RUI Yu-kui, et al. Fatty acid composition of Camellia oleifera oil[J]. Journal Fur Verbraucherschutz Und Lebensmittelsicherheit-Journal of Consumer Protection and Food Safety, 2011, 6(1): 9-12.
- [13] 吴帆, 韩琴, 于勇杰, 等. 香榧与油茶籽中脂肪酸成分的 GC-MS 分析[J]. 中国野生植物资源, 2014, 33(1): 36-39.
 WU Fan, HAN Qin, YU Yong-jie, et al. GC-MS analysis of fatty acids from Torreya grandis and Camellia oleifera seed[J]. Wild Plant Resources in China, 2014, 33(1): 36-39.
- [14] BRAVI E, PERRETTI G, MONTANARI L. Fatty acids by highperformance liquid chromatography and evaporative lightscattering detector[J]. Journal of Chromatography A, 2006, 1 134 (1): 210-214.

⁽上接第56页)