

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.022

基于机器视觉和 BP 神经网络控制的槟榔智能点卤系统设计

黄良沛^{a,b}, 王畅^a

(湖南科技大学 a. 机电工程学院; b. 机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要:针对槟榔自动化加工过程中,点卤工序存在点卤点位、卤水体积难以确定的关键问题,提出一种基于视觉与模糊逻辑控制的槟榔智能点卤系统。对槟榔内轮廓图像采集进行三维轮廓特征提取处理,获取点卤点位与体积的关键参数;通过 BP 神经网络控制实现槟榔的自动点卤。通过 MATLAB/Simulink 软件对槟榔智能点卤过程进行仿真分析,并与传统 PID 控制器在不同点卤速率下的控制效果进行对比。实验结果表明:BP 神经网络控制的超调量低,控制效果精确稳定,提高了槟榔点卤精度及性能。

关键词:槟榔智能点卤;机器视觉;BP 神经网络

中图分类号:TP391.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)03-0112-05

Design of the Intelligent Betel-nut Brine-dropping System Based on Machine Vision and BP Neural Network Control

HUANG Liangpei^{a,b}, WANG Chang^a

(a. College of Mechanical and Electrical Engineering; b. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Targeting at the key problems brine-dropping procedures have in the automatic process of betel-nut processing including the difficulties in identifying brine-dropping positions and brine volume, this paper proposes an intelligent betel-nut brine-dropping system based on visual and fuzzy logic control. Firstly, the three-dimensional contour feature extraction is used to collect the inner contour image of betel nut to obtain the key parameters of brine-dropping positions and volume. Next, the automatic brine-dropping of betel-nut is achieved through BP neural network control. Finally, the intelligent betel-nut brine-dropping process is simulated and analyzed by MATLAB/Simulink software, whose control effect is compared with the traditional PID controller at different brine dropping rates. The experimental results show that the BP neural network control has low overshoot, and the control effect is accurate and stable, which improves the accuracy and performance of betel-nut brine dropping.

Keywords: intelligent betel-nut brine-dropping; machine vision; BP neural network

0 引言

槟榔点卤工艺是槟榔加工过程中核心的步骤之一,该步骤直接影响槟榔的外形与口感^[1]。现在已经有部分厂家采用相应设备实现槟榔的智能点卤。刘志护^[2]设计了一种智能槟榔点卤机,槟榔果在振动装置与刮平器的共同作用下进入排料盘上的各槟榔容纳槽内,实现了槟榔的自动排序。由于槟榔果外形属于不规则形貌物体,其果腔的点卤点位与体积参数不容易确定^[3]。利用机器视觉^[4]实现对槟榔的三维轮廓特征的识别,获取点

卤点位和点卤体积的参数,此方法能精确定位槟榔果腔的内轮廓,提高了点卤工艺的效率。

槟榔点卤过程是一个非线性的复杂系统,上述方法获取关键参数后,可通过神经网络控制实现槟榔的自动点卤。骆明霞^[5]针对数控机床控制系统信号响应速率较慢、超调量较大的问题,提出设计基于 PID 优化的卧式数控机床电气自动控制系统。游敏^[6]引入 BP 人工神经网络遗传算法代替传统 PID 控制,采用 CEMS 实测数据作为反馈信号调节石灰浆流量,表明神经网络 PID 更具鲁棒性。张梦茹^[7]利用 BP 神经网络自学习、自适

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52075163);湖南省自然科学基金与湘潭市科技局联合资助项目(2021JJ50117);湖南省自然科学基金与株洲市科技局联合资助项目(2021JJ50008);湘潭市科技计划重点项目(CG-ZD20211007)

第一作者简介:黄良沛(1971—),男,湖北天门人,教授,博士,研究方向为复杂机电系统动力学分析与控制、机器视觉与运动控制等,294531049@qq.com。

应能力对PID控制参数进行寻优,其控制策略可实现二次供水温度优化。

基于以上研究,本文设计了一种基于机器视觉、神经网络控制的槟榔智能点卤系统,通过视觉板块与控制板块的结合,实现全自动槟榔的智能点卤,提出了最优的槟榔点卤方案。

1 基于机器视觉槟榔图像处理及识别

在视觉板块上对于槟榔图像的处理与识别包含3个部分:图像信息采集、槟榔内轮廓图像识别、内轮廓特征参数的提取。实现槟榔内轮廓的三维特征的提取,通过对槟榔果腔三维轮廓的特征分析获取点卤点位与体积。其算法流程如图1所示。

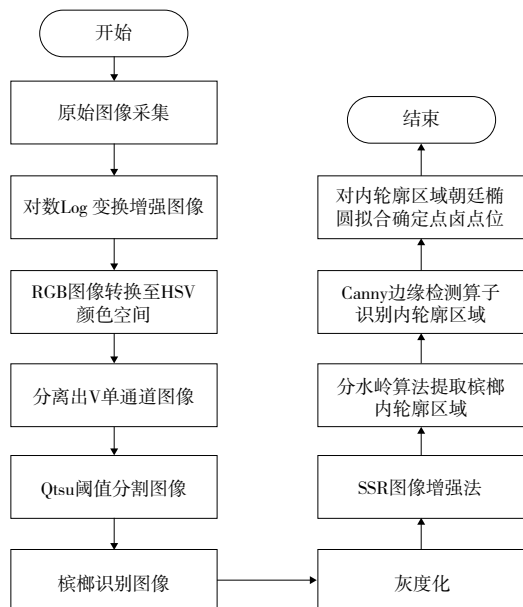
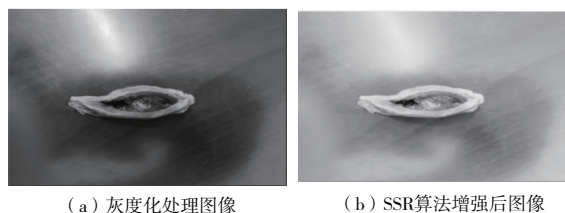


图1 槟榔图像处理算法流程图

1.1 槟榔内轮廓图像识别

1) SSR 图像增强法

根据设计的槟榔自动化加工的情景,槟榔随着输送带运动是一个动态过程,智能点卤这个工序过程会因为现场环境的干扰出现对比度和亮度不够的情况。结合上述情景选择SSR算法对获取的槟榔识别图像进行增强。SSR算法^[8]单尺度视网膜算法是Retinex算法中的一种算法,其优势在于对不同类型的图像在动态范围内进行压缩和边缘增强。通过该算法处理后的槟榔识别图像不仅提高了对比度和亮度,在边缘区域的增强效果为后文实现槟榔内轮廓的识别(前景与背景的分)奠定了基础,如图2所示。



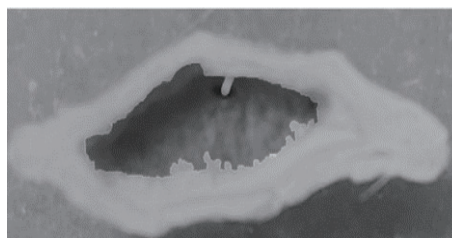
(a) 灰度化处理图像

(b) SSR算法增强后图像

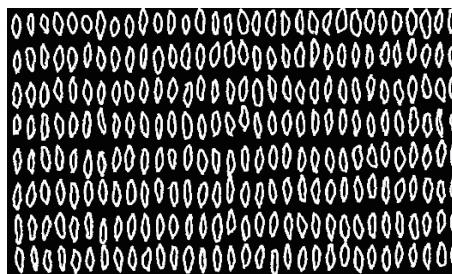
图2 算法处理后的图像

2) 分水岭算法提取内轮廓区域

分水岭(watershed)是基于地理形态的分析的图像分割算法,遍历图像所有像素点,并按照灰度值进行分类,分类区域像素点每一个灰度级对应一个等高线。对各个分类区域的最小值产生影响的区域边界就是“分水岭”,也被称作“波峰线”^[9]。因此可以找到槟榔内轮廓图像中灰度值最小的像素点,记作 $h_{\min}$,设定一个测地线距离阈值 M ,将 $h_{\min}$ 到 M 的距离不断增大,领域的像素会慢慢被淹没,这样就可以对图像进行分类。分水岭算法提取槟榔内轮廓区域如图3(a)所示,对整个摆盘提取的内轮廓区域如图3(b)所示。



(a) 分水岭算法提取内轮廓图像



(b) 整个摆盘槟榔内轮廓提取图像

图3 提取的内轮廓区域图像

1.2 槟榔内轮廓特征参数提取

1) 果腔长度、宽度检测及点卤点位的确定

经过上述处理已经提取出槟榔内轮廓区域,采取Canny边缘检测算子^[10]对内轮廓区域进行边缘检测来识别内轮廓。Canny边缘检测的算法主要是基于图像强度的二阶导数,它的优势在于在梯度方向角对梯度幅值采取非极大值抑制,实现“胖边缘”变成“瘦边缘”,如图4所示。使用

OpenCV 图像处理库中的 `fitEllipse()` 函数来实现几何距离最小二乘法拟合椭圆,即可完成果腔长度与宽度的检测,取椭圆的长轴两个端点为槟榔的点卤点位,如图 5 所示。

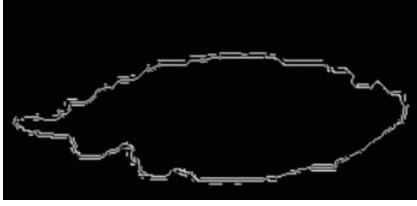


图 4 Canny 算子识别内轮廓

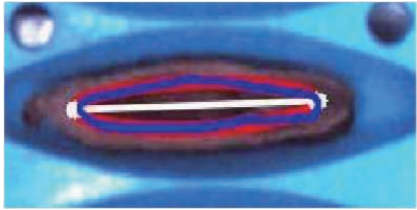


图 5 椭圆拟合内轮廓确定点卤点位

2) 线结构光检测果腔深度及点卤体积的确定
首先通过线结构光扫描槟榔果,根据三角测量原理找到果腔深度与被测点亚像素光条中心的关系,如图 6 所示。

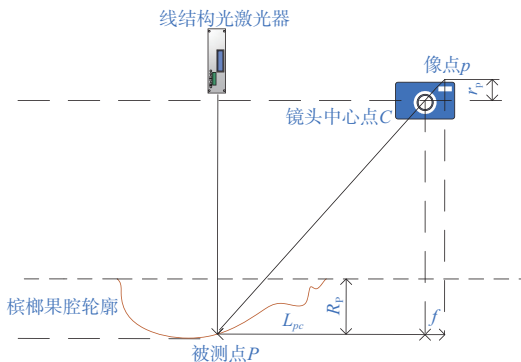


图 6 线结构光深度测量原理图

设被测孔在点 P 径向深度 R_p ,由三角测距原理表示出 P 点深度和该像点亚像素半径的关系,计算表达式如下

$$R_p = \sqrt{x_c^2 + y_c^2} = \frac{L_{pc}}{f} r_p \quad (1)$$

$$r_p = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (2)$$

$$R_p = \xi r_{np} \quad (3)$$

式中: $\xi = \mu L_{pc} / f$; x_c, y_c 为像点 p 像素半径; r_{np} 为 P 点在相机坐标系下的坐标; x_i, y_i 为成像点 p 在像平面的坐标;因此采用适当方法将光条中心点的

像素半径提取出来,以精确确定 r_{np} 值,即可获取 P 点的径向深度。采用同样的方法,可以在一次测量中将线结构光所照亮的果腔内截面 δ 角的轮廓上所对应点径向深度测量出来。由此可见,欲测果腔的深度即找到线结构光的光条中心的亚像素级半径即可。

结合对于线结构光光条中心的提取常用的方法有:边缘法、中心法、细化法、灰度中心法、Steger 算法等。因为槟榔果腔的结构光图像容易被噪声影响,会出现提取的中心线精度不高的问题。综合考虑采用 Steger 算法^[11]对光条中心进行提取,且 Steger 算法本身可以实现对光条中心亚像素级的提取。配合前面的三角测距原理得到的结论即实现了对果腔深度及体积的检测,从而得到最优卤体积的参数。

2 基于 BP 神经网络控制的槟榔智能点卤系统

2.1 智能点卤系统控制原理

点卤系统采用速度控制,控制原理如图 7 所示。

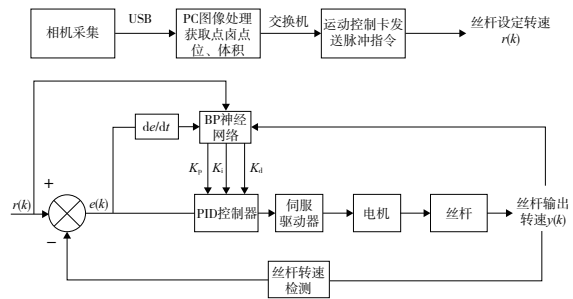


图 7 智能点卤控制系统原理图

在对槟榔图像进行采集处理与特征提取,并获取了点卤点位与体积的关键特征参数以后,将信息传输至运动控制卡通过换算得到对应的丝杆转速输入到点卤系统中。通过伺服系统的编码器测量转速作为反馈量,将比较量输入到 BP 神经网络 PID 控制器中获取最优解,将此结果输入伺服驱动器,伺服驱动器调节电机的转速从而调节点卤位置,实现槟榔的智能点卤控制。

2.2 BP 神经网络控制

BP 神经网络是一种前馈神经网络^[12],主要的两个过程是计算输出结果和反向球梯度更新参数。神经网络的主要作用是根据系统的输出误差调整拟合出非线性关系来调整 PID 控制器的参数^[13]。本文采用 3-4-3 的 3 层 BP 神经网络结

构如图8所示,输入层神经元为3个,隐含层神经元数为4个,输出层神经元数为3个。

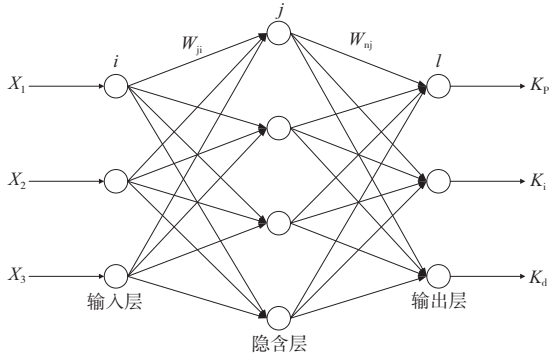


图8 BP神经网络结构图

输入层的神经元个数为3个,分别对应智能点卤系统丝杆转速期望目的值 $r(k)$, 点卤系统丝杆转速的实际输出值 $y(k)$, 转速的偏差 $e(k)$, BP神经网络输入层的输入输出分别为

$$\begin{cases} X_1 = r(k) \\ X_2 = y(k) \\ X_3 = e(k) \end{cases} \quad (4)$$

$$O_i^{(1)}(k) = X_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

为了使神经网络学习效果更好,本文选择S型正切函数作为隐含层的激活函数

$$f(x) = \frac{1 - e^{-ax}}{1 + e^{-ax}} \quad (a > 0) \quad (6)$$

因此隐含层的输入、输出可表示为

$$\begin{cases} net_j^{(2)}(k) = \sum_{i=1}^4 W_{ji}^{(2)} \cdot O_i^{(1)}(k), \quad j = 1, 2, 3, 4 \\ O_j^{(2)}(k) = f(net_j^{(2)}(k)), \quad j = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (7)$$

输出层的神经元个数为3个,分别对应智能点卤系统的3个参数 K_p 、 K_i 、 K_d ,因为这3个参数始终为正数,选择非负的Sigmoid函数作为输出层的激活函数

$$g(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}}, \quad (a > 0) \quad (8)$$

因此神经网络输出层的输入、输出可表示为

$$\begin{cases} net_l^{(3)}(k) = W_{lj}^{(3)} \cdot O_j^{(2)}(k), \quad l = 1, 2, 3 \\ O_l^{(3)}(k) = g(net_l^{(3)}(k)), \quad l = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (9)$$

式中隐含层与输入层的连接权值以及输出层与隐含层的连接权值分别为 $W_{ji}^{(2)}$ 、 $W_{lj}^{(3)}$ 。

BP神经网络的反向传播过程就是利用负梯

度下降法由输出层至隐含层至输入层多次迭代,修改各层神经元的权值,求解目标函数的极小值的权值。神经网络的性能指标函数为

$$E(k) = \frac{1}{2} [r(k) - y(k)]^2 \quad (10)$$

隐含层至输出层的连接权值修正量为

$$\begin{aligned} \Delta W_{lj}^{(3)}(k) &= -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial W_{lj}^{(3)}} + \alpha W_{lj}^{(3)}(k-1) = \\ &= \eta e(k) \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \cdot \frac{\partial u(k)}{\partial O_l^{(3)}(k)} \cdot g'(net_l^{(3)}(k)) \cdot \\ &= f(net_j^{(2)}(k)) + \alpha W_{lj}^{(3)}(k-1) \end{aligned} \quad (11)$$

输入层至隐含层的连接权值修正量为

$$\begin{aligned} \Delta W_{ji}^{(2)}(k) &= -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial W_{ji}^{(2)}} + \alpha W_{ji}^{(2)}(k-1) = \\ &= \eta \left\{ \sum_{l=1}^3 e(k) \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \cdot \frac{\partial u(k)}{\partial O_l^{(3)}(k)} \cdot g'(net_l^{(3)}(k)) \cdot \right. \\ &= W_{lj}^{(3)}(k) \left. \right\} \cdot f'(net_j^{(2)}(k)) \cdot X_i + \alpha W_{ji}^{(2)}(k-1) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: α 为惯性系数; η 为学习速率。

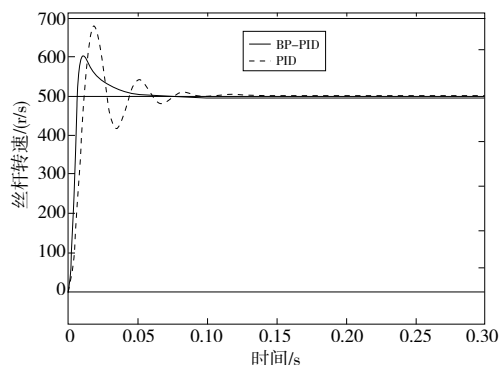
3 仿真与分析

3.1 BP神经网络控制系统设计

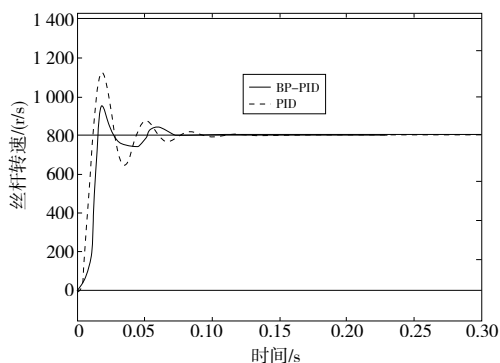
在Simulink环境中对已搭建的点卤系统各个子模块按照点卤控制系统框图有序组合,建立BP神经网络控制器的工业点卤模型,对系统各个子模块做封装处理。

3.2 不同速率点卤仿真分析

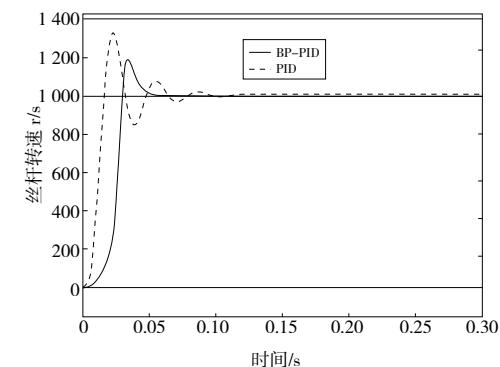
对BP神经网络PID、传统PID控制器下的系统进行仿真分析,丝杆分别以500 r/s、800 r/s、1000 r/s的不同速率输入系统,其转速响应对比如图9所示。由仿真分析知,在点卤系统低速(500 r/s)运行时,BP神经网络控制的性能优于传统PID控制;而在系统中高速(800 r/s、1000 r/s)运行时BP神经网络控制系统阶跃响应稳定信号时间比传统PID久,但是无论点卤系统以任何速度运行,BP神经网络控制的超调量且曲线的稳定性均优于传统PID控制器。由于自动点卤过程是一个精密的过程,另外考虑现在槟榔产业对槟榔口感的要求越来越高,因此选择超调量更低曲线抖动更加稳定的BP神经网络控制器更符合现代化槟榔企业的需求,也更贴合本文高精度点卤的要求。



(a) 500 r/s速率响应对比图



(b) 800 r/s速率响应对比图



(c) 1000 r/s速率响应对比图

图9 转速响应对比图

4 结语

本文将机器视觉与运动控制两大板块结合,设计了基于视觉与BP神经网络控制的槟榔智能点卤系统,通过机器视觉实现对槟榔果腔三维轮廓

的识别获取点卤体积与点位,配合BP神经网络控制实现高效、精确点卤。通过上述分析,BP神经网络PID控制器超调量相对于传统PID控制器更低,控制效果更佳,鲁棒性更好,输出更稳定,更符合槟榔行业的要求。

参考文献:

- [1] 杜鹏. 槟榔点卤关键技术与结构设计[D]. 湘潭:湘潭大学,2017.
- [2] 刘志护. 智能化槟榔点卤设备:CN106107685A[P]. 2016-11-16.
- [3] 彭艳梅,龚年春,李鹏辉,等. 食用槟榔加工过程中成分变化及多元统计分析[J]. 中国食品工业,2021(21):96-101.
- [4] 包子涵,李龙海,刘丽丽,等. 基于机器视觉的救援机器人自动避障技术研究[J]. 机械制造与自动化,2024,53(1):202-208.
- [5] 骆明霞. 基于PID优化的卧式数控车床电气自动控制系统[J]. 自动化技术与应用,2023,42(11):34-37.
- [6] 游敏. BP神经网络在垃圾焚烧电厂酸性气体排放控制中的应用[J]. 自动化应用,2024,65(1):35-37.
- [7] 张梦茹. BP神经网络在换热站自动控制系统中的应用研究[D]. 张家口:河北建筑工程学院,2023.
- [8] 陈超. 改进单尺度Retinex算法在图像增强中的应用[J]. 计算机应用与软件,2013,30(4):55-57,74.
- [9] 李凯臣,李俊芳,于晓,等. 基于结构重建距离分水岭的细胞图像目标提取[J]. 天津理工大学学报,2023,39(4):39-45.
- [10] 窦蕾萍,吴君钦. 基于改进Canny算法的图像边缘检测[J]. 软件导刊,2023,22(8):216-220.
- [11] GIULIETTI N, CHIARIOTTI P, REVEL G M. Automated measurement of geometric features in curvilinear structures exploiting steger's algorithm[J]. Sensors,2023,23(8):4023.
- [12] 黄松,黄宇杰,何杨烨. 基于神经网络优化算法的海洋动态缓波型立管设计[J]. 海洋工程,2024,42(3):83-94.
- [13] 陈鸿林,贾宪章,贾宝柱,等. 基于BP神经网络算法的光伏发电预测研究[J]. 中国设备工程,2024(3):153-155.

收稿日期:2024-03-14