

基于支持向量回归的核桃在线称重系统

Design of walnut online weighing system based on support vector regression

金作徽^{1,2} 翟志强^{1,2} 张若宇^{1,2} 邹昆霖^{1,2} 庞宇杰^{1,2}

JIN Zuo-hui^{1,2} ZHAI Zhi-qiang^{1,2} ZHANG Ruo-yu^{1,2} ZOU Kun-lin^{1,2} PANG Yu-jie^{1,2}

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 新疆 石河子 832000; 2. 农业部西北农业装备重点实验室, 新疆 石河子 832000)

(1. Mechanical and Electrical Engineering College, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

2. Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

摘要:为了对核桃重量进行在线检测,采用加速度传感器信号对称重传感器信号动态补偿校准和支持向量回归(SRV)预测方法,设计多传感器信息融合的核桃重量在线测试系统。对 400 枚核桃分别在速度为 0.02, 0.03, 0.05 m/s 条件下进行数据采集,并对采集的数据进行训练和校验,分析得到最优的核桃重量预测模型为基于线性核函数的 SVR 模型,较佳的测试速度为 0.03 m/s。利用 200 枚核桃样本在 0.03 m/s 的条件下进行实验验证,结果显示系统预测的核桃重量与核桃实际重量线性拟合的 r^2 为 0.85, 平均绝对误差为 1.67 g, 表明该系统可以较为准确地实现核桃在线称重。

关键词:在线称重;支持向量回归;多传感器;核桃

Abstract: In order to accurately detect walnut weight online, a walnut weight online testing system based on multi-sensor information fusion was designed, which was adopted the method of dynamic compensation and calibration to process signal collected from an acceleration sensor and symmetrical weight sensors and used the algorithm of support vector regression (SRV) to predict the walnut weight. Then, 400 walnuts were used to acquire weight data at speed of 0.02, 0.03 and 0.05 m/s respectively based on this system. Meanwhile the data were trained and verified. The better prediction model of walnut weight was determined as SVR model with linear kernel function, and the best test speed was determined as 0.03 m/s. Finally, 200 walnut samples were tested online at the speed of 0.03 m/s. The results showed that r^2 of linear fitting between the walnut weight prediction and their actual weight was 0.85, and the average absolute error of linear fitting was 1.67 g. The results indicated that the system can accurately test walnut weight.

Keywords: online weighing; support vector regression; multi-sensor; walnut

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:31560341)

作者简介:金作徽,男,石河子大学在读硕士研究生。

通信作者:张若宇(1980—),男,石河子大学教授,博士。

E-mail: ry248@163.com

收稿日期:2017-12-07

重量测试是农产品品质检测的重要内容之一^[1],是农产品的分级包装和缺陷剔除的一项重要参考指标。农产品重量实时监测主要是利用力传感测试技术在线获取的方式实现,在果蔬^[2-3]、禽蛋^[4-5]和肉类^[6]等农产品分级设备上已有大量应用,然而中国现有的在线称重系统相比于国外的,在精度和稳定性方面还有待进一步提升^[7]。毛建东^[8]采用对传感器进行动态补偿方法和具有仿人智能控制算法的模糊控制器,提高了动态称重速度,但称重精度较低,称重误差 <25 g。杜冬冬^[9]设计了一种带式输送的甘蓝动态称重系统,甘蓝通过输送带下降至称重平台,触发光电开关进行称重,在 0.1, 0.2, 0.3 m/s 输送条件下,均方根误差分别为 20.79, 25.74, 32.80 g, 速度对称重精度和稳定性影响较大。Pawlowski 等^[10]采用了斜坡滑轨抬升果杯的方式使水果和果杯整体作用于称重平台上,通过感应触发采集称重信号实现了动态称重,并通过快速非平稳滤波方法和补偿函数提高称重精度,平均误差 <3.5 g。

由于核桃本身重量较轻,在运输过程中易受机械冲击的影响导致运动状态改变,采用传统的动态称重方法,无法准确获取核桃质量数据。本研究拟采用信息融合的方式实现加速度传感器信号对称重传感器信号的动态补偿,利用支持向量回归的方法对采集的加速度、倾角数据和称重信号进行训练融合,得到核桃实际重量预测模型,从而实现核桃在线称重。

1 系统硬件构成

核桃动态称重系统的硬件构成见图 1。

核桃输送装置位于动态称重传感模块上方的载台上,传

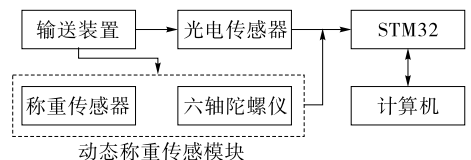


图 1 系统硬件结构

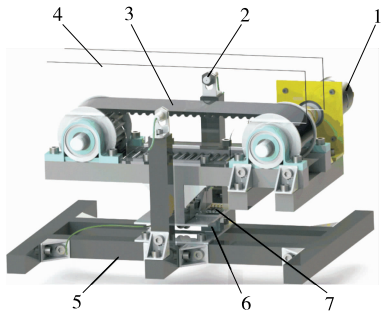
Figure 1 System hardware structure

感模块主要由悬臂梁式称重传感器和数字式六轴陀螺仪组成。输送装置运送核桃时,动态称重传感模块随输送装置同步振动并采集称重 AD 值、加速度、角加速度和倾角数据。对射式光电传感器位于输送装置两侧,当核桃样本经过时触发开关信号,传感模块数据通过 STM32 单片机发送至计算机,计算机通过数据分析测算出核桃重量。

2 动态称重系统的设计

2.1 动态称重系统机械结构设计

动态称重系统的机械结构主要包括带式输送部分和悬臂梁式称重部分。输送带采用橡胶同步带,表面光滑,摩擦系数小。输送部分的动力由 24 V 直流电机(ZGA60FM-G 型,正科电机有限公司)提供,配合正反反转开关 PWM 马达调速器(DCTS-10A-9 型,江苏南京中科电机有限公司)可实现无级变速。整个输送部分为一个独立单元,通过螺栓连接固定在称重模块上方的平台上。称重部分位于整个机械结构的下方,称重传感器悬空端与称重平台连接,另一端固定在底部的基座上。称重传感器上下两端分别装有垫片防止传感器与其他部分过多接触,产生无关信号。动态称重装置总体结构见图 2。



1. 直流电机 2. 光电传感器 3. 运输带 4. 有机玻璃挡板 5. 底座 6. 悬臂梁式称重传感器 7. 数字式六轴陀螺仪

图 2 在线称重装置结构

Figure 2 Structure of the on-line weighing device

2.2 动态称重传感模块设计

在核桃输送过程中,由于机械结构的周期性振动和核桃运动过程中的速度变化,导致称重传感器测试得到的信号中存在大量的干扰信号。其中,机械装置的振动主要是电机带动同步带机构运转过程中的机械摩擦、皮带周期性张紧与松弛、电机转动惯性等因素^[11]引起的。同时,核桃在同步带上运动过程中不可避免地会产生速度波动,也会对重量测试结果产生影响。

为了准确测试核桃的重量,本研究设计采用悬臂梁式称重传感器和数字式六轴陀螺仪相结合的动态称重传感模块,六轴陀螺仪与称重传感器悬空端紧密固定,收集装置运动过程中的加速度、角加速度和倾角等数据,从而对称重传感器测量数据进行信号补偿和修正。同时,为了尽量减小核桃运动带来的干扰,选择在输送带中后部安装光电传感器以确定核桃位置,从而实现在核桃平稳运动阶段收集测试数据。

2.3 信号采集电路与上位机软件

信号采集系统采用 TPYboard 系列的 Micro Python 开

发板(V102 型,山东萝卜电子科技有限公司),主芯片为 STM32F405。称重传感器选用悬臂梁式电阻应变片传感器(YZC-133 型,广州电测仪器厂),量程 5 kg,输出灵敏度为 $(1.0 \pm 0.15) \text{ mV/V}$ 。串口 6 轴电子陀螺仪采用 MPU6050 模块(JY-61 型,深圳市天士凯电子有限公司),工作电压为 3.3~5.0 V,具备串口输出功能,方便开发应用。称重传感器信号接收利用开发板的 ADC 接口,12 位分辨率,采用均值计数方法。加速度传感器通过串口输出信号。光电传感器的信号通过 GPIO 端口接收。

信号采集电路板与计算机通过 Micro USB 数据线连接,采用虚拟串口软件将计算机 USB 接口设置为串行通信端口。信号采集电路与上位机的通讯利用 LabVIEW 软件的 VISA 模块实现,通过相应的函数设置串口参数,建立缓存并读取数据。之后,利用字符串操作函数对采集的数据进行截取和归类,转换成相应的一维数组并输入重量预测模型,经计算后输出核桃重量。程序流程见图 3。

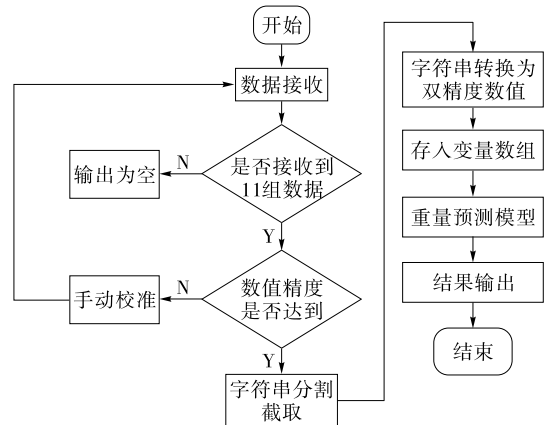


图 3 上位机程序流程

Figure 3 Flow chart of host computer program

3 试验

3.1 材料与方法

3.1.1 试验样本 采集新疆温宿县产的新新 2 号、新早丰、343 号和温 185 号 4 个品种的薄皮核桃。每个品种随机选取 100 枚,共 400 枚核桃样本以 3:1 的比例划分为训练集和校验集。

3.1.2 数据采集 利用设计的动态称重装置在不同的输送速度条件下对选取的样本进行在线测试,在数据采集过程中采用均值滤波的方法消除粗大误差,经过精度校验后得到称重 AD 值、 x,y,z 三轴加速度、角加速度和倾角数据,将其作为变量数据。之后利用电子天平在静态条件下测试对应的核桃重量,将其作为实际核桃重量数据。

3.1.3 建立 SVR 模型 利用 Minitab16.0 软件分别对称重 AD 值、 x,y,z 三轴加速度、角加速度和倾角数据等数据与核桃重量数据之间的相关性进行了分析,并依据相关系数大小对变量排序,剔除了相关性较小和负相关的变量。从而优选出与核桃实际质量相关性较强的变量,建立了新的数据集,并同样以 3:1 的比例划分为训练集和校验集。

研究采用支持向量回归算法对训练集数据进行训练,并

建立预测模型。支持向量回归有 3 种不同的实现形式: ϵ -SVR, NuSVR 和 LinearSVR, 本研究采用 ϵ -SVR 实现。

对于给定的训练向量组 $x_i \in R^p (i=1, \dots, n)$ 和目标向量 $y_i \in R^n (i=1, \dots, n)$, ϵ -SVR 要解决如下规划问题^[12]:

$$\underset{\omega, b, \zeta, \zeta^*}{\text{minimize}} \frac{1}{2} \omega^T \omega + C \sum_{i=1}^n (\zeta_i + \zeta_i^*), \quad (1)$$

约束条件:

$$\begin{cases} y_i - \omega^T \varphi(x_i) - b \leq \epsilon + \zeta_i; \\ \omega^T \varphi(x_i) + b - y_i \leq \epsilon + \zeta_i^*; \\ \zeta_i, \zeta_i^* \geq 0, \end{cases} \quad (2)$$

式中:

- ω ——权值向量;
- b ——决策阈值;
- ζ_i, ζ_i^* ——松弛变量;
- ϵ ——与目标值的偏差;
- C ——惩罚参数;

$\varphi(x_i)$ ——高维空间映射函数;

i ——样本编号, $i=1, \dots, n$ 。

支持向量回归算法的具体过程:

(1) 构建训练数据集 $T = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\} \in (X \times Y)^n$, 其中 $x_i \in X = R^p, i=1, \dots, n; y_i \in Y = R^n, i=1, \dots, n$ 。

(2) 选取适当的正数 ϵ 和 C ; 选择适当的核函数 $K(x_i, x_j)$ (如线性 Linear, 径向基 RBF 和多项式 Poly 等)。

(3) 构造原问题的对偶问题, 并求解最优化问题, 依据 Wolfe 对偶定理^[13] 采用拉格朗日函数构建该问题的对偶问题为:

$$\min_{\alpha, \alpha^*} \frac{1}{2} (\alpha - \alpha^*)^T Q (\alpha - \alpha^*) + \epsilon e^T (\alpha + \alpha^*) - y^T (\alpha - \alpha^*), \quad (3)$$

约束条件:

$$\begin{cases} e^T (\alpha - \alpha^*) = 0; \\ 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C, i=1, \dots, n, \end{cases} \quad (4)$$

式中:

- α, α^* ——拉格朗日函数引入的乘子;
- e^T ——所有变量;
- C ——惩罚参数;
- Q ——一个 $n \times n$ 的半正定矩阵;
- Q_{ij} ——核函数, $Q_{ij} = K(x_i, x_j)$ 。

求出最优解 $\bar{\alpha} = (\bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_1^*, \dots, \bar{\alpha}_n, \bar{\alpha}_n^*)^T$ 。

(4) 根据上述问题的最优解构造决策函数:

$$f(x) = \sum_{j=1}^n (\alpha_j - \alpha_j^*) K(x_i, x) + b, \quad (5)$$

$$b = \frac{1}{n} \left\{ \sum_{0 < \alpha_i < C} [y_i - \sum_{x_j \in SV} (\alpha_j - \alpha_j^*) K(x_j, x_i) - \epsilon] + \sum_{0 < \alpha_i^* < C} [y_i - \sum_{x_j \in SV} (\alpha_j - \alpha_j^*) K(x_j, x_i) - \epsilon] \right\}, \quad (6)$$

式中:

- b ——所求出的线性决策函数的截距;
- SV——支持向量的集合, $i, j=1, \dots, n$ 。

(5) 依据决策函数计算得到目标值。为了得出较优的预测模型, 本研究以回归模型拟合优度和平均绝对误差为指标, 对比了采用不同核函数(线性 Linear, 径向基 RBF 和多项式 Poly)对测试集数据进行重量预测的结果。

3.2 重量预测结果

研究中建立的 SVR 模型对校验集核桃数据的预测结果见表 1。根据生产效率要求与核桃外形尺寸范围, 选择在输送速度分别为 0.02, 0.03, 0.05 m/s 条件下, 对比 3 种预测模型的 r^2 和平均绝对误差(MAE)可以发现, 在相同情况下线性核函数的各项指标最优, 可能是当核桃在输送带上处于平稳运动状态时, 运动过程中加速度和倾角的变化对称重传感器测量的影响较大, 各个变量通过线性核函数变换到高维空间时与重量数据的相关性更强。综上, 最终确定采用线性核函数的 SVR 算法对在线称重的核桃重量进行预测。同时, 在带速为 0.02 m/s 时, 由于电机在低速状态下状态不稳定对测量结果有一定的影响, 综合考虑生产效率和后续在线视觉检测的需要, 确定输送速度为 0.03 m/s。

表 1 不同速度下 SVR 的重量预测结果

Table 1 Weight prediction results of SVR at different speeds

运输速度/ (m · s ⁻¹)	核函数	r^2	MAE/ g	相对误差/ %
0.02	Linear	0.89	1.63	13.46
	RBF	0.76	1.65	13.62
	Poly	0.74	1.62	13.37
0.03	Linear	0.91	1.57	12.96
	RBF	0.77	1.62	13.37
	Poly	0.74	1.56	12.87
0.05	Linear	0.90	1.57	12.96
	RBF	0.78	1.61	13.29
	Poly	0.73	1.54	12.71

3.3 在线验证

利用 LabVIEW 软件提供的接口调用建立好的 SVR 模型搭建了在线检测系统, 并在 4 个核桃品种中各选取 50 枚样本, 共 200 枚核桃用于在线测试。如图 4 所示, 在线检测

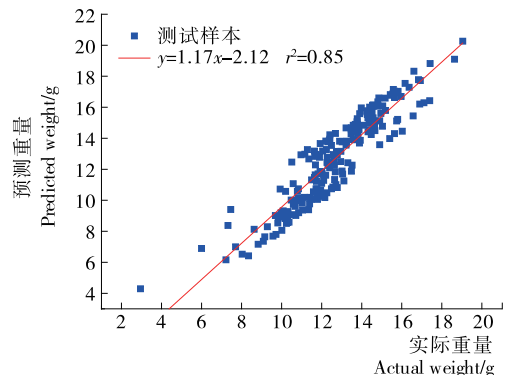


图 4 在线测试拟合结果

Figure 4 Linear fitting results of the on-line test

(下转第 126 页)

[8] LU Hao, SHAO Xing-feng, CAO Jin-xun, et al. Antimicrobial activity of eucalyptus essential oil against *Pseudomonas* in vitro and potential application in refrigerated storage of pork meat[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2016, 51(4): 994-1 001.

[9] HUANG Xiao-jie, LI Jing, SHANG Hong-li. Effect of methyl jasmonate on the anthocyanin content and antioxidant activity of blueberries during cold storage[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(2): 337-343.

[10] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 44-46.

[11] ADIL Gani, WAQAS N Baba, MUDASIR Ahmad, et al. Effect of ultrasound treatment on physico-chemical, nutraceutical and microbial quality of strawberry[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 66: 496-502.

[12] 孝培培. 微孔包装膜在三种耐二氧化碳果蔬保鲜上的应用[D]. 天津: 天津科技大学, 2016: 1-6.

[13] MARWA Yahyaoui, OIHANA Gordobil, RENÉ Herrera Díaz, et al. Development of novel antimicrobial films based on poly(lactic acid) and essential oils[J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2016, 9: 1-8.

[14] 李家政, 毕大鹏. 不同保鲜膜包装对蜜柚冷藏效果和货架品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(S1): 315-319.

[15] 王羽, 梁敏, 齐小晶, 等. 包装材料对樱桃番茄气调保鲜效果的影响[J]. *包装工程*, 2016, 37(19): 91-96.

[16] 于悦, 徐莹, 汪东风, 等. 含茉莉酸甲酯的生物活性膜对蓝莓采后保鲜效果的研究[J]. *保鲜与加工*, 2016, 16(1): 16-20.

[17] 王磊明, 李洋, 张茜, 等. 壳聚糖-肉桂精油复合膜对蓝莓保鲜效果的影响[J]. *食品科技*, 2017, 42(9): 14-21.

[18] SUAREZ B, ALVAREZ A L, GARCIA Y D, et al. Phenolic profiles antioxidant activity and in vitro antiviral properties of apple Oomace[J]. *Food Chemistry*, 2010, 120(1): 339-342.

[19] 李志刚, 袁慧蓉, 石建春. 鲜切冬瓜贮藏过程中质构品质变化分析[J]. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2010, 30(3): 270-273.

[20] 姜燕, 柳佳齐, 尤婷婷, 等. 壳聚糖-甲氧基果胶涂膜在蓝莓冷藏保鲜中的应用[J]. *食品工业*, 2015, 36(7): 151-155.

[21] 韩斯, 孟宪军, 汪艳群, 等. 氯化钙处理对速冻蓝莓冻藏期品质的影响[J]. *食品科学*, 2014, 35(22): 310-314.

[22] 王瑞, 胡旭林, 谢国芳, 等. 生长期喷施有机钙对蓝莓鲜果的保鲜作用研究[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(6): 211-218.

[23] 于军香, 郑亚琴, 房克艳. 壳聚糖涂膜结合冰温贮藏对蓝莓活性成分及抗氧化活性的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(14): 271-275.

[24] 陈云霞, 田密霞, 胡文忠, 等. 蓝莓花色苷提取工艺及其抗氧化性研究[J]. *保鲜与加工*, 2015, 15(2): 34-39.

[25] 张一妹. 壳聚糖可食膜的制备及其对蓝莓的保鲜作用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013: 33-35.

(上接第 92 页)

核桃重量与核桃实际重量线性拟合的 r^2 为 0.85, 平均绝对误差为 1.67 g, 相对误差为 13.21%, 说明试验装置可较为准确地实现核桃在线称重。

4 结论

本研究设计了一种带式输送方式的核桃在线称重系统。利用支持向量回归的方法实现了加速度传感器信号对称重传感器信号的动态补偿。通过对比不同运输速度下采用不同核函数的支持向量回归的预测结果, 得到了最佳的运输速度与核函数分别为 0.03 m/s 与线性核函数。以 200 枚核桃在线测试的结果与实际质量进行线性拟合的 r^2 为 0.85, 平均绝对误差为 1.67 g。结果表明, 该系统可较为准确地实现核桃重量在线测试。

参考文献

[1] 张剑一. 动态称重数据处理算法及其在禽蛋和类球形水果分选中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 27-34.

[2] 李光梅, 魏新华, 李法德, 等. 水果机器视觉质量综合分选机的设计[J]. *农机化研究*, 2008(11): 124-126.

[3] 吴晓强, 黄云战, 赵永杰. 基于运动控制器的苹果质量分级系统[J]. *食品与机械*, 2015, 31(5): 114-116.

[4] SUN Li, YUAN Lei-ming, CAI Jian-rong, et al. Egg freshness on-line estimation using machine vision and dynamic weighing[J]. *Food Analytical Methods*, 2015, 8(4): 922-928.

[5] ZHANG Jiang-yi, YING Yi-bin, JIANG Huan-yu, et al. Application of optimized digital filters and asymmetrically trimmed mean to improve the accuracy of dynamic egg weighing[J]. *Transactions of the ASABE*, 2017, 60(4): 1 099-1 111.

[6] LIU Tong-liang, ZHENG Xue-hai, LI Chen. Design of fresh sea cucumber weighing sorting machine [C]// *International Conference on Advanced Information Technology and Sensor Application*. New York: IEEE, 2015: 16-19.

[7] 韩乔生, 芦金石, 陶学恒, 等. 高效高精度动态静态组合块状食品称重分选系统[J]. *食品与机械*, 2016, 32(10): 89-93.

[8] 毛建东. 动态称重系统的动态补偿和校正[J]. *食品与机械*, 2006, 22(2): 84-86.

[9] 杜冬冬. 履带自走式甘蓝收获机研究及称重系统开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 11-17.

[10] PAWLOWSKI A, RODRIGUEZ F, SANCHEZ-HERMOSILLA J, et al. Fast nonstationary filtering for adaptive weighing system[C]// *IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*. New York: IEEE, 2015: 1-6.

[11] 李殿起, 张艳珠. 永磁电动机转子非线性动力特性[J]. *机械强度*, 2004, 26(2): 127-131.

[12] SMOLA A J, SCH LKOPF B. A tutorial on support vector regression[J]. *Statistics & Computing*, 2004, 14(3): 199-222.

[13] 田英杰. 支持向量回归机及其应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005: 22-24.