

# 果蔬表面粗糙度特性检测触觉传感器设计与试验\*

陶镛汀 周俊 孟一猛 张娜 杨肖蓉

(南京农业大学江苏省智能化农业装备重点实验室, 南京 210031)

**摘要:** 为使农业机器人能够通过“触摸”检测果蔬表面粗糙度特性,设计并制作了一种PVDF触觉传感器,通过触觉信号处理分析检测果蔬的表面粗糙度特性。利用ANSYS有限元分析选择传感器模型的有效信息获取区域,将PVDF压电薄膜和电阻应变片以不同方向和位置随机排布在该区域。搭建触觉信息检测平台,通过多通道数据采集程序对3种不同粗糙度等级的样本进行数据采集与存储,提取样本特征,建立支持向量回归机算法模型,并通过基于径向基核函数的SVR算法对果蔬表面粗糙度进行预测。试验结果与实际设定粗糙度等级一致,证明所设计触觉传感器能有效检测果蔬表面粗糙度特性。

**关键词:** 农业机器人 触觉传感器 果蔬 表面粗糙度 支持向量回归

**中图分类号:** TP242.6\*1; TG84 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0016-06

## Design and Experiment of Tactile Sensors for Testing Surface Roughness of Fruits and Vegetables

Tao Yongting Zhou Jun Meng Yimeng Zhang Na Yang Xiaorong

(Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

**Abstract:** In order to provide useful information for grasping of agricultural robot via perceiving surface roughness of fruits and vegetables, we designed and produced a PVDF tactile sensor, perceiving surface roughness via processing of tactile signal. With the mechanical analysis by ANSYS, we could determine the effective area and the reasonable location of sensor model. Four PVDF piezoelectric films and the resistance strain chips were randomly arranged in the model of fingers. The random distribution of the sensor elements would make tactile sensor as much as possible to obtain a wealth of information about the work environment. We built up a platform of tactile information detection to process data collection from three different roughnesses of fruits through multi channels data acquisition program. After extracting the sample characteristics, the maximum value, the minimum value and the difference between the maximum and minimum values of the signal were calculated as the tactile sensor characteristics. The differences between the maximum value and the minimum value of the signal were used as the pressure sensor characteristics. Then the SVR algorithm model was established to test the surface roughness of the fruits and vegetables. Experimental results were consistent with the actual setting of roughness class, which proved that the tactile sensor can detect surface roughness characteristics of fruits and vegetables.

**Key words:** Agricultural robots Tactile sensor Fruits and vegetables Surface roughness Support vector regression

### 引言

农业机器人主要承担果蔬采摘、分选、嫁接及农

田作业等任务<sup>[1-2]</sup>。在果园、温室以及农田等复杂工作环境中,面对果蔬这种柔性农业物料,不仅要求机器人能够完成对作业对象的识别与定位,还要求

收稿日期: 2015-04-13 修回日期: 2015-06-02

\* 国家自然科学基金资助项目(31471419)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130097110043)

作者简介: 陶镛汀, 博士生, 主要从事农业机器人研究, E-mail: taotao2033612@163.com

通讯作者: 周俊, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机器人、机器视觉和模式识别研究, E-mail: zhoujun@njau.edu.cn

机器人能够在每次抓取时采用最佳的抓取策略,实时调整初始抓取力、控制过程抓取力以及手抓闭合速度等抓取参数,以准确、无损地完成抓取操作。而单纯的依靠“视觉”只能获取对象的空间几何参数以及彩色信息,这就需要机器人能够通过“触觉”感知获取作业对象的表面特性如表面粗糙度,根据表面特性调整相关的抓取参数,避免每次抓取或作业对象改变时人为重新设定抓取参数。通过触觉传感器获取果蔬表面粗糙度特性信号,进行信号处理分析提取有效信息并实现粗糙度检测是解决这一问题的关键。

物体的表面粗糙度能够在传感器接触表面时通过其表面纹理的凹凸特性反馈以电信号方式再现。Lederman 等<sup>[3]</sup>在物体表面通过探针运动轨迹来反映物体表面纹理信息,王明枝等<sup>[4]</sup>也采用探针法来检测木材表面的粗糙度。但探针法不能反馈完整的物体表面二维纹理信息,使粗糙度分析存在缺陷,而且探针在物体表面拖动时会对柔软物体表面造成损伤。针对这些不足,研究者开始对基于压电材料的物体表面特性及粗糙度反馈进行研究。Sadao 等<sup>[5]</sup>研制了一种压电式传感器,通过触觉信号分析区分坚硬和柔软物体以帮助机器人在抓取时控制抓取力,但单一传感元件降低了传感器的信息反馈维度使坚硬和柔软程度的区分标准模糊,影响最终结果。Jamali 等<sup>[6]</sup>将 PVDF 压电薄膜和应变片嵌入到硅橡胶制作的手指中,通过手指在不同材料表面滑动摩擦获取纹理及粗糙度信号,用傅里叶变换提取可分辨信号,最后利用贝叶斯分类器对地毯、海绵、地板等 7 种不同表面纹理的材料进行了准确分类。Takamuku 等<sup>[7]</sup>强调了检测物体表面特性对抓取控制的必要性,采用 PVDF 压电薄膜和应变片制作了机器人手指与手掌,用手指轻敲以及手掌挤压物体,并根据不同纹理及粗糙度特性对物体进行区分。

农业机器人在对果蔬进行作业时,如何采取最优抓取力、抓取策略以及控制抓取力大小、手抓闭合速度等都是影响作业成功率的因素,而表面粗糙度特性能够有效帮助机器人调整这些参数,提高抓取成功率。综合国内外用于粗糙度检测的传感器研究来看,从传感器结构设计布置到信号特征提取分析都有可以改进的地方。本文设计制作一种可检测果蔬粗糙度特性的 PVDF 压电薄膜触觉传感器,并通过实验验证其有效性和稳定性。

## 1 PVDF 触觉传感器

聚偏二氟乙烯是一种新型高分子压电性传感器材料,具有柔性好、声阻抗低、频响宽以及质量轻等

优点<sup>[8-10]</sup>。当 PVDF 压电薄膜承受一定方向的外力而产生变形时,在它的材料晶面或极化面上会产生等量异种电荷,并聚集在薄膜两侧的电极上,利用该特性使 PVDF 压电薄膜与物体表面接触,并使两者之间产生相对滑动,压电薄膜的微单元会由于物体表面细微纹理颗粒造成的挤压而产生感应电荷,测量该电荷量可以被用来判断与之接触的物体表面特性。

本文所设计制作的传感器结构模仿人手指外形制成,内部分布 PVDF 压电薄膜和电阻应变片。传感器的布置原则是:选用尽可能多的敏感元件并随机布置在软质材料硅橡胶下面。采用随机布置的策略<sup>[6,11]</sup>,一方面简化了传感器的制作,另一方面通过单一敏感元件随机排布获取不同位置、方向的信息能使作为整体的传感器得到对象更立体、全面的信息。综合考虑实验室的集成条件、实际传感器尺寸以及敏感元件尺寸,本文最终选择用硅橡胶模型内嵌 4 片 PVDF 和 4 片电阻应变片制作成一个仿手指的半拱形形状的触觉传感器。PVDF 元件主要用于动态应变的测量,电阻应变片主要用于静态应变的测量。

### 1.1 触觉传感器力学分析

由于所使用的敏感元件的输出都是比较微小的量,若布置太深可能会导致敏感元件输出很小或几乎为零,从而导致信号的无用或无可用信号。此外由于传感器尺寸及实验室集成度所限只能内嵌 4 组传感元件,因此制作传感器前要对传感器模型进行有限元分析,通过观察传感器内部的受力及变形情况,选择有效与合理的可排布区域,从而确保在有限的集成条件下检测到尽可能多的信号输出。

本文所设计的传感器模型尺寸为 40 mm × 30 mm × 15 mm。将绘制好的三维图形导入 ANSYS 软件中进行静力学分析。所用的硅橡胶为一种超弹性材料,在有限元分析中常用 Mooney - Rivlin 模型来描述<sup>[12]</sup>。单元类型为超弹性单元 HYPER58,经试验和计算得到该材料的弹性模量  $E = 2.14 \text{ MPa}$ ,泊松比为 0.48。通过设置材料参数、导入模型、划分网格、添加约束、施加力、求解等步骤得到分析结果。

根据模型在物体表面的运动进行模拟分析,对模型上表面加载 100 N 的正压力  $F$  以及 50 N 的滑动摩擦力  $f$ ,作用时间为 10 s,经过计算求解,得出该硅橡胶模型的应力分布和位移变形情况。从图 1a 可以看出,应力较大的地方集中在模型的中部,最大值出现在  $Z$  轴正方向的上下边缘处,最小值集中在  $X$  轴方向的两侧区域。由图 1b 可以看出位移变形

较大的地方集中在模型的中部接近上表面的区域,变形量最大的地方为Z轴正方向的上边缘。

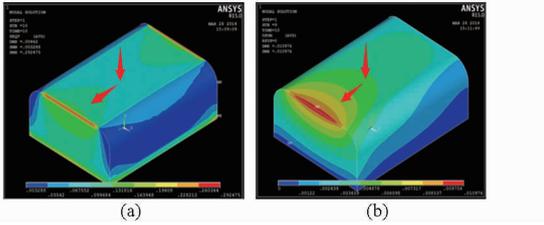


图1 触觉传感器有限元分析

Fig.1 Finite element analysis of tactile sensor

(a) 模型应力分布 (b) 模型位移分布

根据分析结果可知,传感器的有效信息获取区域集中在中间区域。在触觉传感器制作时,将敏感元件的排布方向、顺序及位置随机布置在该区域,既能使信号输出最大化,又能使传感器更全面地获取对象信息。

## 1.2 传感器制作

触觉传感器制作所用材料为辽宁省锦州市科信电子材料有限公司销售的PVDF压电薄膜,尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ ,厚度为 $30\text{ }\mu\text{m}$ ,实物如图2a所示。所用电阻式应变片尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ ,应变片电阻为 $1\text{ }000\text{ }\Omega$ ,灵敏系数为2.08,实物如图2b所示。采用南大703硅橡胶作为模型填充剂,当其完全固化后具有一定的与人体皮肤相似的柔软度,当触觉传感器与物体表面接触时有利于信号的传递。

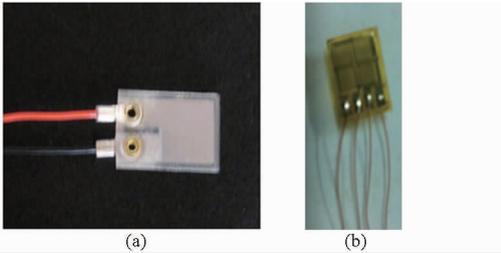


图2 PVDF压电薄膜和电阻式应变片

Fig.2 PVDF piezoelectric film and resistance strain gauge

(a) PVDF压电薄膜 (b) 电阻式应变片

如图3所示,首先,用3D打印机打印所要制作的触觉传感器的模具,将PVDF和应变片任意布置于其中,尽可能地布置在传感器的中间区域,并用南大703硅橡胶进行灌封,等待一周左右时间使其完全固化后取出模型。

## 2 机器人触觉信息采集系统

嵌入PVDF压电薄膜和电阻应变片制成的模仿人类手指触觉传感器,利用其在受外力挤压变形下会在两极形成等量异性电荷的特性,设计了基于触觉信息的物体表面触觉信息检测系统。如图4所示,整个触觉信息检测系统平台由末端执行器、

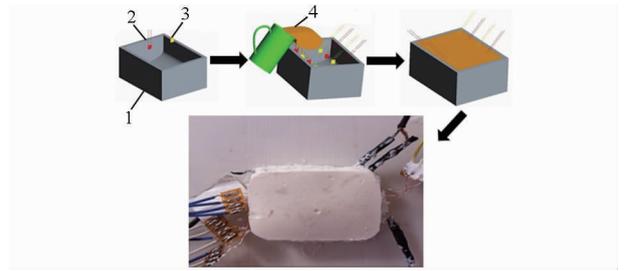


图3 触觉传感器制作过程及实物图

Fig.3 Production process of tactile sensor and its physical map

1. 传感器模型 2. PVDF压电薄膜 3. 电阻式应变片 4. 703胶水

PVDF触觉传感器、压力传感器、电荷放大器、应变放大器、数据采集系统、计算机等组成。



图4 触觉信息检测系统

Fig.4 Tactile information detection system

1. PVDF触觉传感器 2. 压力传感器 3. 末端执行器 4. 多通道数据采集系统 5. 工控机 6. NI数据采集卡 7. 电荷放大器 8. 应变放大器

末端执行器采用德国SCHUNK公司的两指夹持器,型号为EVG55。制成的触觉传感器和一个由FSR-402型力敏电阻制作的压力传感器被安装在机器人二指平行手爪上。触觉传感器用于触觉信息的检测,指力传感器用于控制试验样品与手指之间的夹持力。

由于从触觉传感器直接输出的电荷信号( $d_{33} = 21\text{ pC/N}$ )以及应变片产生的电荷信号都是微弱信号,不易传输和采集,需要采用电荷放大器将输出的电荷信号转换成电压信号,并通过数据采集卡将输出的电压信号转换成计算机可以处理的数字信号并进行存储、分析等。本试验所采用的电荷放大器是江苏东华测试股份有限公司的DH5853电荷放大器和DH3841应变放大器。

数据采集设备为NI公司NI9174型数据采集器,该机箱可提供4槽,模块型号为NI9215,采用差分方式输入,具有4路 $\pm 10\text{ V}$ 差分输入通道,每个通道单独配备一个16位的A/D转换器,可以实现每通道100 K的同步采样。触觉信息检测系统软件部分主要完成数据波形的采集和存储,通过数据采集卡NI-9215与LabVIEW软件共同完成。数据采集卡NI-9215将外部的电压信号输入到计

计算机,然后通过 LabVIEW 对采集到的波形进行滤波、显示和存储。本试验系统中需要用到 8 通道数据采集系统,因此在 LabVIEW 软件中编写了一个多通道数据采集系统。触觉传感器和压力传感器的输出经过电荷放大器后传输至数据采集系统,最后传入计算机通过信号处理系统进行信号处理。

### 3 果蔬表面粗糙度检测

#### 3.1 果蔬表面触觉信号采集

为了验证该传感器对果蔬表面粗糙度特性检测的有效性及准确性,机器人触觉信息检测系统构建完成后,需要采集样本表面触觉信号,并通过信号处理与分析进行试验。试验在一个二指平行手爪上进行,左指安装制作的触觉传感器,右指安装标定好的压力传感器,压力传感器的输出反馈给平行手爪,对抓取力进行控制。抓取过程原理及实物如图 5 所示。

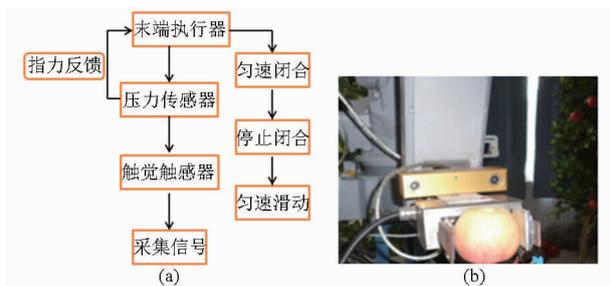


图 5 试验抓取流程

Fig. 5 Flowchart of grasping experiment

(a) 试验流程 (b) 实物

触觉信息获取过程,首先闭合手爪,触觉传感器与试验样品缓慢接触,当压力传感器的力达到 1 N 后停止闭合,保持恒定的力。然后控制机械手从试验样品的一端匀速滑动到另外一端。结束后,末端执行器离开试验样品表面并回到初始位置。在本试验中,作用于试验样品的力与滑动的速度是保持恒定的。

本试验选择 3 种不同表面粗糙度的果蔬作为试验样品:苹果、哈密瓜和黄瓜,样本实物如图 6 所示。每种样品试验 140 次,一共获得 420 组试验数据,用于后续的特征提取、样本训练与粗糙度预测。

#### 3.2 基于支持向量回归机的果蔬表面粗糙度检测模型构建

支持向量机 (Support vector machine, SVM) 是 Vapnik 等在多年统计学习理论研究基础上提出的一种机器学习方法,它是建立在统计学习的 VC 维 (Vapnik Chervonenkis dimension) 理论和结构风险最小化准则的基础上,能够充分利用有限的样本信息,

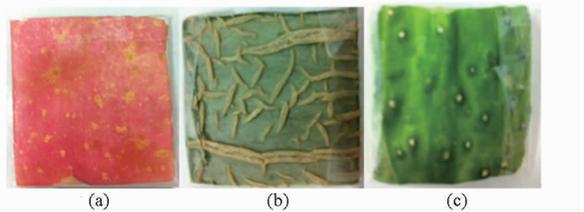


图 6 试验样本

Fig. 6 Experimental samples

(a) 苹果 (b) 哈密瓜 (c) 黄瓜

在模型的复杂性和学习能力之间寻求最佳折衷,在一定程度上克服了“过学习”和“维数灾难”等传统困难,在文本分类、预测和时间序列预测领域都得到了成功应用<sup>[13-15]</sup>。支持向量回归机 (Support vector regression, SVR) 作为 SVM 处理拟合回归问题的一类模型,通过建立训练数据中的待预测向量和支撑向量间的非线性关系,对测试数据的待预测向量进行预测<sup>[16-17]</sup>。支持向量回归机模型公式

$$f(\mathbf{x}) = \omega\phi(\mathbf{x}) + b = \sum_{i=1}^n (a_i - a_i^*) K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) + b \quad (1)$$

式中  $\phi(\mathbf{x})$ ——特征空间  $\omega$ ——权重系数  
 $b$ ——偏置项  $K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)$ ——核函数  
 $\mathbf{x}_i$ ——训练样本向量  
 $\mathbf{x}$ ——测试数据向量  
 $a_i, a_i^*$ ——拉格朗日乘子

目前常用的核函数包括高斯径向基核函数、多项式核函数、多层感知基核函数和傅里叶核函数等。针对样本数据,本文选取学习能力较强,参数选取较简单的径向基核函数,即

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2}{\sigma^2}\right) \quad (2)$$

式中  $\sigma$ ——核半径,控制函数复杂度

根据支持向量回归机模型,首先要从采集到的果蔬表面信号中提取特征作为训练集,然后利用训练数据集确定 SVR 模型参数,最后根据 SVR 模型预测该种水果对应的表面粗糙度等级。

##### 3.2.1 信号特征选择

通过上述试验方法每种样品采集 8 个信号,4 个为触觉传感器输出信号,4 个为电阻应变片输出信号。对于采集到的 3 种果蔬触觉信号,需要进行观察与分析,然后对其进行特征提取。通过观察与信号输出的比较,确定了触觉传感器输出信号的最大值  $T_{\max}$ 、信号最小值  $T_{\min}$ 、信号最大值与最小值之间的差值  $T_{\text{dk}} = |T_{\max} - T_{\min}|$  作为特征值。确定了压力传感器输出信号的最大值与最小值之间的差值  $P_{\text{dk}} = |P_{\max} - P_{\min}|$  作为特征值。这样,每个样品共

选择了16个特征值来表征该样品。3种试验样品的典型信号如图7所示,这里只分别给出每种样本

的1组触觉和压力的输出信号。试验中,采样频率为1000 Hz。

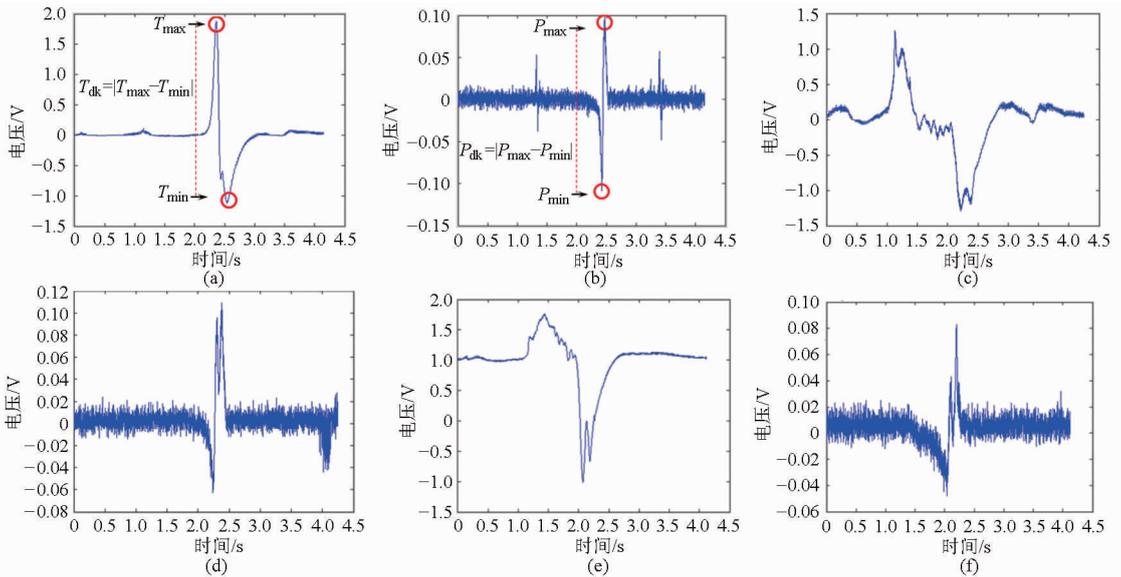


图7 试验样本的输出信号

Fig. 7 Output signals of samples

(a) 苹果的触觉 (b) 苹果的压力 (c) 哈密瓜的触觉 (d) 哈密瓜的压力 (e) 黄瓜的触觉 (f) 黄瓜的压力

### 3.2.2 支持向量回归机参数选取

由于参数的选取对支持向量回归机的预测精度具有较大影响,因此,在确定核函数的基础上,选择合适的参数尤为重要<sup>[18-19]</sup>。本文采用K-折交叉验证结合网格搜索法来确定核函数的参数、SVR中惩罚参数 $C$ 和不敏感损失函数 $\varepsilon$ 。

## 4 试验结果与分析

### 4.1 试验结果

根据实际经验,将黄瓜、哈密瓜、苹果3种果蔬的表面粗糙度程度由粗糙到光滑分为3个等级。黄瓜因其表面分布有坚硬的毛刺,表面凹凸不平感显著,所以相比于其它两种样本,将黄瓜表面粗糙度等级定义为粗糙。为了建立传感器输出信号与粗糙度之间的数量关系,选择数值1来定量表示该粗糙度等级。哈密瓜表面分布纵沟纹或斑纹,表面比较粗糙,数量化等级为2。苹果表面无毛刺和显著的纹理特征,比较光滑,粗糙度等级定量为3。这些等级数值大小主要是表征不同粗糙度之间的相对关系,以便在随后的机器人自动抓取时采取不同的操作控制策略。

打乱样本数据并随机抽取80%作为训练集,20%作为预测集。利用所得到的支持向量回归模型,对3种果蔬的粗糙度等级进行计算。最终验证了通过计算得到的果蔬粗糙度等级与实际设定值基本一致,试验结果如图8所示。

### 4.2 误差分析

粗糙度等级计算出现误差的原因主要有:

(1) 试验样本差异,因个别样本表面特殊,如个别黄瓜表面毛刺不明显、哈密瓜表面沟纹不突出都会使其表面较为光滑;个别苹果表面有较明显的纹理或局部区域的病变会使其表面较为粗糙。上述情况都会使样本与其所属类别的粗糙度等级不一致。

(2) 在样本表面特征信号获取过程中,不可避免的噪声影响会使极个别样本信号输出出现差异。

(3) 粗糙度等级数量化取值可能还不能完全表征样本实际粗糙度物理特性,将在今后的研究中进一步细化完善。

## 5 结论

(1) 选用4个PVDF压电薄膜传感器元件和4个电阻应变片作为敏感元件,完成了一种用于触觉信息检测的仿人型触觉传感器的制作。确定了传感器敏感元件的布置原则,通过传感器的随机分布尽可能多地获取丰富的外界信息。在ANSYS中对触觉传感器模型进行了静力学分析,分析结果表明应尽可能将传感器元件布置在应变或变形量较大的传感器的中间区域。

(2) 构建了由电荷放大器、触觉传感器、指力传感器、数据采集系统构成的触觉信息检测平台,以FSR-402型力敏电阻作为敏感材料制作并标定了一种指力传感器,以指力传感器输出值作为反馈用于控制夹持力的大小。

(3) 利用支持向量回归机对样本数据进行粗糙度等级检测。通过计算得到的训练样本和预测样本

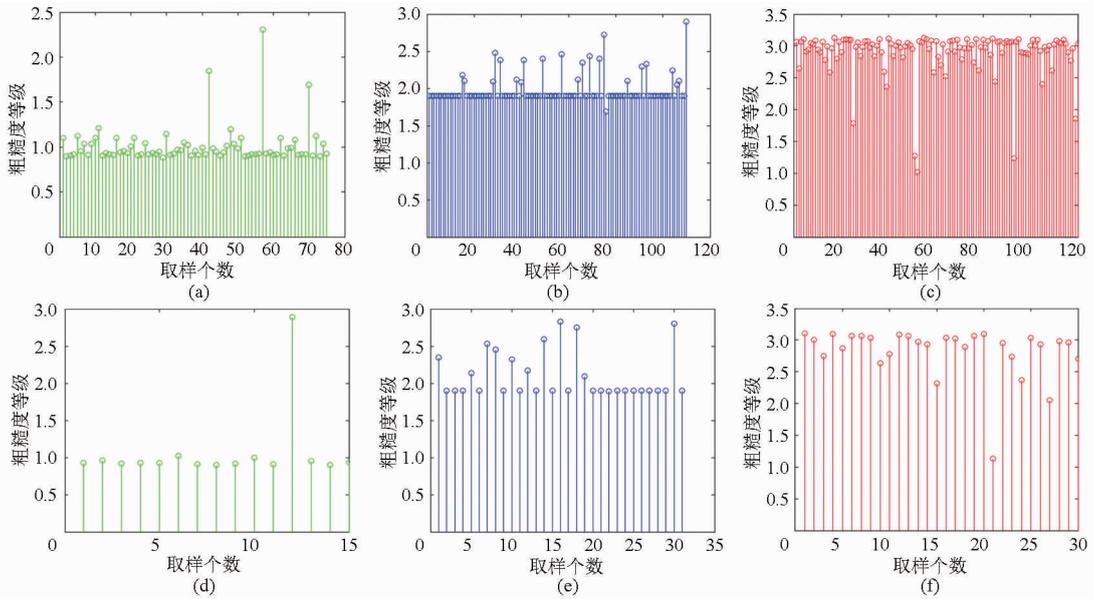


图 8 粗糙度等级检测结果

Fig.8 Test results of roughness

(a) 黄瓜训练集 (b) 哈密瓜训练集 (c) 苹果训练集 (d) 黄瓜预测集 (e) 哈密瓜预测集 (f) 苹果预测集

的粗糙度等级基本与实际设定的等级一致。验证了该传感器可以用来对不同果蔬的表面粗糙度进行检测,以帮助机器人在抓取作业时能够根据不同粗糙

度等级的果蔬调整最优抓取参数,实施最佳抓取策略。

#### 参 考 文 献

- 张铁中, 杨丽, 陈兵旗, 等. 农业机器人技术研究进展[J]. 中国科学:信息科学, 2010, 40(增刊): 71-87.  
Zhang Tiezhong, Yang Li, Chen Bingqi, et al. Research progress of agricultural robot technology[J]. Science China Press, 2010, 40(Supp.): 71-87. (in Chinese)
- Belforte G, Deboli R, Gay P, et al. Robot design and testing for greenhouse applications [J]. Biosystems Engineering, 2006, 95(3): 309-321.
- Lederman S J, Howe R D, Klatzky R L, et al. Force variability during surface contact with bare finger or rigid probe [C] // Proceedings of 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2004: 154-160.
- 王明枝, 王洁瑛, 李黎. 木材表面粗糙度分析[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(1): 14-18.  
Wang Mingzhi, Wang Jieying, Li Li. Roughness and roughness sense of wood surface from different machining processes [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(1): 14-18. (in Chinese)
- Sadao O, Yoshinobu M, Christos E C. Real time robotic tactile sensor system for the determination of the physical properties of biomaterials[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2004, 112(2-3): 278-285.
- Jamali N, Sammut C. Material classification by tactile sensing using surface textures [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010: 2336-2341.
- Takamuku S, Gomez G, Hosoda K, et al. Haptic discrimination of material properties by a robotic hand [C] // IEEE 6th International Conference on Development and Learning, 2007: 1-6.
- 李争彩, 林书玉. 聚偏氟乙烯的性能以及和压电陶瓷的比较[J]. 菏泽学院学报, 2007, 29(2): 51-54.  
Li Zhengcai, Lin Shuyu. The capability and application of polyvinylidene fluoride, and the differences between polyvinylidene fluoride and piezoelectric ceramic [J]. Journal of Heze University, 2007, 29(2): 51-54. (in Chinese)
- 王利恒, 周锡元. PVDF 传感器动态压电特性的试验研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(3): 55-58.  
Wang Liheng, Zhou Xiyuan. Experimental study on dynamic piezoelectricity characteristics of PVDF sensor [J]. Industrial Construction, 2006, 36(3): 55-58. (in Chinese)
- 刘昭博, 彭光正. 基于 PVDF 压电薄膜的灵巧手触觉传感器的研究[J]. 传感器世界, 2008, 13(11): 11-14.  
Liu Zhaobo, Peng Guangzheng. The study of tactile sensor of dexterous hand based on PVDF piezo-film [J]. Research & Development, 2008, 13(11): 11-14. (in Chinese)
- Sinapov J, Sukhoy V, Sahai R, et al. Vibrotactile recognition and categorization of surfaces by a humanoid robot [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2011, 27(3): 488-497.

- sensing system[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 160-165. (in Chinese)
- 5 薛新宇, 梁建, 傅锡敏. 我国航空植保技术的发展前景[J]. 中国农机化, 2008(5): 72-74.  
Xue Xinyu, Liang Jian, Fu Ximin. Prospect of aviation plant protection in China[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2008(5): 72-74. (in Chinese)
- 6 周志艳, 臧英, 罗锡文, 等. 中国农业航空植保产业技术创新发展战略[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 1-10.  
Zhou Zhiyan, Zang Ying, Luo Xiwen, et al. Technology innovation development strategy on agricultural aviation industry for plant protection in China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24): 1-10. (in Chinese)
- 7 Jacopo P, Salvatore Filippo D G, Edoardo F, et al. A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture[J]. Precision Agriculture, 2012, 13(4): 517-523.
- 8 茹煜, 贾志成, 范庆妮, 等. 无人直升机远程控制喷雾系统[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 47-52.  
Ru Yu, Jia Zhicheng, Fan Qingni, et al. Remote control spraying system based on unmanned helicopter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 47-52. (in Chinese)
- 9 彭孝东, 张铁民, 李继宇, 等. 基于目视遥控的无人机直线飞行与航线作业试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 258-263.  
Peng Xiaodong, Zhang Tiemin, Li Jiyu, et al. Experiment of straight and airline flight operation for farmland based on UAV in visual remote mode[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 258-263. (in Chinese)
- 10 丁团结, 方威, 王锋. 无人机遥控驾驶关键技术研究及飞行品质分析[J]. 飞行力学, 2011, 29(2): 17-24.  
Ding Tuanjie, Fang Wei, Wang Feng. Development of UAV remote-piloted key technology and flight qualities[J]. Flight Dynamics, 2011, 29(2): 17-24. (in Chinese)
- 11 花德隆. 基于概率 A 星和智能体的无人机路径规划[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 1-60.
- 12 张斌, 钱正祥. 基于蚁群算法的无人机航迹规划技术及研究现状[J]. 战术导弹技术, 2012(4): 58-62.  
Zhang Bin, Qian Zhengxiang. Research status of route planning of UAV based on ant colony algorithm[J]. Tactical Missile Technology, 2012(4): 58-62. (in Chinese)
- 13 王光磊, 张昕. 基于地形回避技术的无人机航路规划[J]. 指挥信息系统与技术, 2014, 5(5): 49-52.  
Wang Guanglei, Zhang Xin. Flight path planning for UAV based on terrain avoidance technology[J]. Command Information System and Technology, 2014, 5(5): 49-52. (in Chinese)
- 14 董晓璋, 许莺. 基于云理论的无人机航路规划算法[J]. 指挥信息系统与技术, 2014, 5(5): 44-48.  
Dong Xiaozhang, Xu Ying. Route planning algorithm for UAV based on cloud theory[J]. Command Information System and Technology, 2014, 5(5): 44-48. (in Chinese)
- 15 周路菡. 无人机物流时代渐行渐近[J]. 新经济导刊, 2014(4): 51-54.
- 16 翁丹宁. 无人机物流配送的主要影响因素分析[J]. 企业改革与管理, 2015, 4(2): 170.

(上接第 21 页)

- 12 黄建龙, 解广娟, 刘正伟. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡胶工业, 2008, 50(8): 467-471.  
Huang Jianlong, Xie Guangjuan, Liu Zhengwei. FEA of hyperelastic rubber material based on Mooney-Rivlin model and Yeoh model[J]. China Rubber Industry, 2008, 50(8): 467-471. (in Chinese)
- 13 Wu Chih-Hung, Tzeng Gwo-Hshiang, Lin Rong-Ho. A novel hybrid genetic algorithm for kernel function and parameter optimization in support vector regression[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3): 4725-4735.
- 14 邓乃扬, 田英杰. 支持向量机: 理论与拓展[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- 15 丁世飞, 齐丙娟, 谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(1): 2-10.  
Ding Shifei, Qi Bingjuan, Tan Hongyan. An overview on theory and algorithm of support vector machines[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology, 2011, 40(1): 2-10. (in Chinese)
- 16 Chang C, Lin C. LIBSVM: a library for support vector machines[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2011, 2(3): 27-65.
- 17 刘琰. 支持向量机核函数的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- 18 Smola A J, Schölkopf B. A tutorial on support vector regression[J]. Statistics and Computing, 2004, 14(3): 199-222.
- 19 奉国和. SVM 分类核函数及参数选择比较[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(3): 123-124.  
Feng Guohe. Parameter optimizing for support vector machines classification[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(3): 123-124. (in Chinese)
- 20 周俊, 朱树平. 农业机器人果蔬抓取中滑觉检测研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 171-176.  
Zhou Jun, Zhu Shuping. Slippage detection in gripping fruits and vegetables for agricultural robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 171-176. (in Chinese)
- 21 傅隆生, 张发年, 槐岛芳德, 等. 猕猴桃采摘机器人末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 1-8.  
Fu Longsheng, Zhang Fanian, Gejima Yoshinori, et al. Development and experiment of end-effector for kiwifruit harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 1-8. (in Chinese)
- 22 王粮局, 张铁中, 褚佳, 等. 大容量高效草莓采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 252-258.  
Wang Liangju, Zhang Tiezhong, Chu Jia, et al. An efficient strawberry harvesting end-effector with large misalignment tolerance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 252-258. (in Chinese)