

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104317

# 基于3D结构光的芒果位姿判别与体积质量预测\*

周朔 宋飞虎 李臻峰 李静

(江南大学机械工程学院 无锡 214000)

**摘要:**目前大部分芒果需通过人工识别体积质量来实现分拣和分级,造成效率低下、缺乏数据管理。机器视觉是提高芒果分级效率的有效手段,然而传统的工业相机仅能获取二维投影。针对这一情况,利用3D结构光系统,获取芒果的形状描述子结合三维深度信息。然后以80个矫正集为样本,利用Fisher判定方法进行位姿检测,并由非线性支持向量机建立“平躺”、“直立”两种位姿下的体积和质量预测模型,并对20个预测集进行误差分析。结果表明,加入深度信息后,位姿检测的准确率可提高到100%,体积质量的平均误差降低到5%以内。

**关键词:**结构光相机;形状描述子;图像处理;回归模型;Fisher判定

**中图分类号:**TP391.4;TN06 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**510.4050

## Mango position detection volume and quality prediction based on 3D structural light

Zhou Shuo Song Feihu Li Zhenfeng Li Jing

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214000, China)

**Abstract:** At present, most mangoes still need to be sorted and graded through manual identification of volume and quality, resulting in low efficiency and lack of data management. Machine vision is an effective means to improve the efficiency of mango grading, but traditional industrial cameras can only obtain two-dimensional projections. In response to this situation, this paper uses a 3D structured light system to obtain mango shape descriptors combined with three-dimensional depth information. Then 80 correction sets are used as samples, and the fisher judgment method is used for pose detection, and the non-linear support vector machine establishes the volume and mass prediction models in the “flat” and “upright” poses. Error analysis is performed on the prediction set. The results show that after adding depth information, the accuracy of pose detection can be increased to 100%, and the average error of volume quality can be reduced to less than 5%.

**Keywords:** structured light camera; shape descriptor; image processing; regression model; Fisher judgment

## 0 引言

芒果的品质指标是其分类和决定其商品价值的重要因素之一<sup>[1]</sup>。其中芒果的个头大小和质量是品质分选的重要指标,目前大部分果农使用眼睛和手来逐个分级。因这一主方法效率低下,在大规模生产中,尤其是生产及分选流水线上需要一种自动化检测方法取代人工<sup>[2-4]</sup>。

随着科技的发展,机器视觉技术正在广泛的应用于农产品和食品加工的检测和监测<sup>[5]</sup>。

Abdullah等<sup>[6]</sup>和Nandi等<sup>[7]</sup>通过CCD相机拍摄输送带上的芒果的俯视图,再从中提取投影面的若干轮廓特征,预测芒果体积及质量。但是传统相机只能获取二维信息,快速流水线上的芒果位姿并不固定,“平躺”和“直立”状态下的表面轮廓、起伏差异很大,所以仅凭投影面积预测体积会造成一定的误差。针对这一问题3D相机正在逐渐应用在农产品测量中<sup>[8]</sup>。Rashid等<sup>[9]</sup>提出了一种芒果自动权重分级系统,在视觉系统中利用左、右两台摄像机构成双目立体视觉系统,根据两个视角的视差确定芒果高度这一第三维的信息,能有效提高体

收稿日期:2021-05-18 Received Date: 2021-05-18

\* 基金项目:国家自然科学基金(21606109)项目资助

积及质量的预测精度。

上述研究均取得了一定成果,但是使用两台相机成像导致系统较为繁琐<sup>[10-11]</sup>。为此,本文提出了基于 3D 结构光系统的芒果体积质量的快速测量方法。在获取俯视图的圆形度、外接矩形、轮廓描述子等二维信息,以及第三维上的深度信息后,使用主成分分析法对数据进行降维,利用 Fisher 判别确定芒果的位姿。然后根据二维投影面积与芒果表面各点的三维深度信息,分别建立“平躺”和“直立”状态下的芒果体积及质量预测模型。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验材料

本文研究试供品种为‘玉芒’,购于广西芒果种植基地,即将成熟时空运至江南大学实验室,共计样品数 100 个。在此次实验中,样品的体积在 220~600 cm<sup>3</sup>,这就基本上涵盖了市场上所有的芒果的体型,这就保证了算法的通用性和实用性。

### 1.2 真实体积质量测量

将芒果放置于电子秤上(上海良平电子天平 JY10002,精度 0.01 g)获得真实质量,芒果的体积测量由排水法完成。

### 1.3 图像与深度采集

将 3D 结构光系统放置于拍照支架上,高度约 50 cm。试验供图像与 2020 年 10 月初采集,采集系统简图如图 1 所示,由 3D 结构光相机、可见光相机、计算机、USB3.0、固定支架、暗箱组成。将结构光系统和芒果放置于暗箱中,暗箱中有条状光源来保证光源一致,系统中的可见光相机获取芒果不同位姿的图像,结构光系统的红外点阵发射器向待测芒果发射随机结构光点阵,红外点阵会被芒果的高度所调制,由于发出的红外点阵的每个点在空间邻域上都是唯一的,待测芒果的各个点的高度决定的点阵的调制结果<sup>[12]</sup>。表面深度图如图 2 所示。

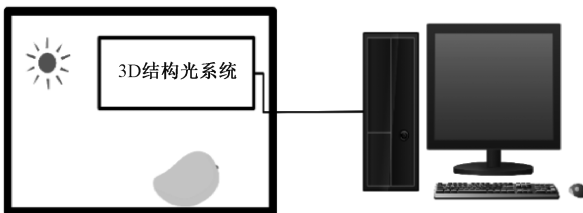


图 1 3D 结构光芒果检测系统

Fig. 1 Schematic diagram of 3D structured light mango detection system

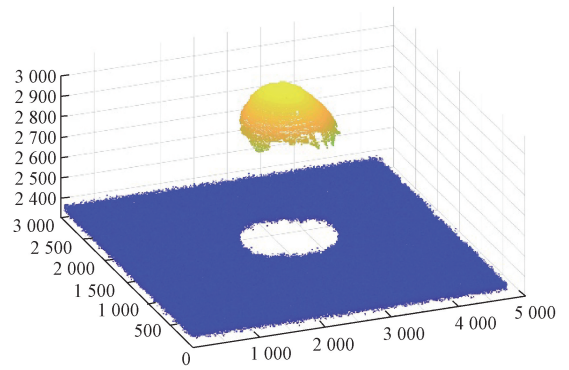


图 2 芒果表面三维信息

Fig. 2 3D information of mango surface

深度信息,一共获得 200 个位姿信息和深度信息。图像通过 USB3.0 导入到 LabVIEW2015 中进行图像处理,深度信息由 MATLAB2019 进行分析和处理。将 80%的样本作为校验集,其余 20%作为预测集来验证模型的鲁棒性。

### 1.4 轮廓特征提取方法

目前对于物体轮廓的提取,在二维方面上,常用的形状描述特征算子主要包括外接矩形的长、宽、不变矩和傅里叶描述子等<sup>[13]</sup>;在三维方面,增加了深度信息的提取,以及高度与二维外接矩形长宽的比值,本文用上述特征作为轮廓信息的特征向量。

### 1.5 芒果位姿检测

芒果在流水线上进行视觉系统体积质量预测时,在不受外力干扰的情况下有两种姿态,一种是‘平躺’,即较大较宽的面朝上如图 3(a)所示;另一种为‘直立’,即较窄较长的一面朝上,如图 3(b)所示。在进行视觉识别时,需要对芒果进行位姿检测,提取相关轮廓特征,之后利用 Fisher 判别对位姿进行检测。

### 1.6 芒果的体积、质量预测

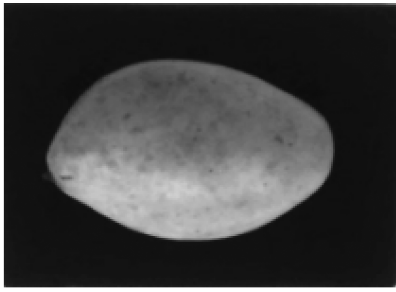
利用二维相机获得的像素投影面积以及三维相机获得的表面深度信息,根据识别出的两种位姿分别建立对应位姿体积的支持向量机(SVM)预测模型,利用模型对体积进行预测,之后根据预测出的体积对质量进行预测。

## 2 结果与讨论

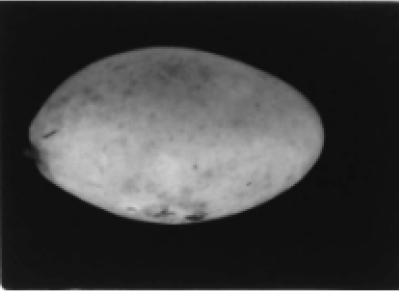
### 2.1 芒果与背景的二值化

本文采用白色背景,图像在采集过程中常被各种随机噪声污染<sup>[14]</sup>,为了保证实验精度,需要去除背景和噪声<sup>[15-16]</sup>。由于待测芒果和背景的像素值差异较大,且此处只需要提取芒果的投影面积以及边缘信息,不需要对缺陷进行识别,可直接用单一阈值分割来消除背景提取物体,图像二值化结果如图 4 所示。

在获取图像和深度后,将芒果翻转,再次获取图像和



(a) 芒果平躺位姿  
(a) Mango lying position



(b) 芒果直立位姿  
(b) Mango upright position

图 3 芒果两种位姿示意

Fig. 3 Two position of mango

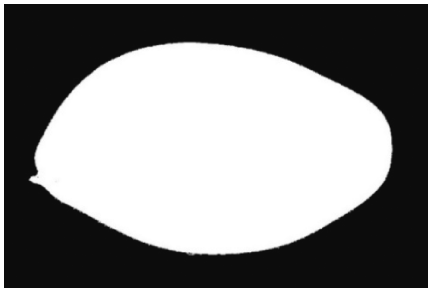


图 4 芒果去除背景的二值图像

Fig. 4 Binary image with mango background removed

### 2.2 芒果轮廓信息提取与特征降维

本文芒果边缘与背景区分度较大,本研究使用 Sobel 边缘检测算子对上文获取的二值图像进行边缘检测,从而提取物体边缘信息。Sobel 算子用水平方向卷积核  $G_x$ 、垂直方向卷积核  $G_y$  对原始图像进行卷积,如果以  $B$  代表原始图像, $G_x$  和  $G_y$  分别为横向和纵向检测的灰度值,如下:

$$\begin{cases} G_x = GX \otimes B \\ G_y = GY \otimes B \end{cases} \quad (1)$$

边缘检测的检测结果  $G$  是在  $x$  和在  $y$  方向上的两个卷积结果的线性叠加,如下:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (2)$$

根据使用 Sobel 边缘检测获得的边缘图像以及上文

去除背景的二值图像,从中提取常用的边缘描述算子即从边缘曲线中提取傅里叶描述子,从二值图中获得外接矩形的长与宽、Hu 不变矩以及芒果的圆形度、傅里叶描述子是一种图像特征,提取频域信息作为图像的特征向量,用一个向量代表一个轮廓,进而识别物体<sup>[17]</sup>。坐标转换如图 5 所示,横坐标表示  $x$  轴以及转换后的复平面  $u$  轴,纵坐标表示  $y$  轴以及转换后的复平面  $v$  轴。于是,  $(x_k, y_k)$  与转换后的  $u_k + jv_k$  是相互的对应点,之后首先将频域和时域坐标系融合,边缘上选取任意一点环绕一周,假设边界一共  $N$  个点,得到边界频域序列,如式(3)所示。

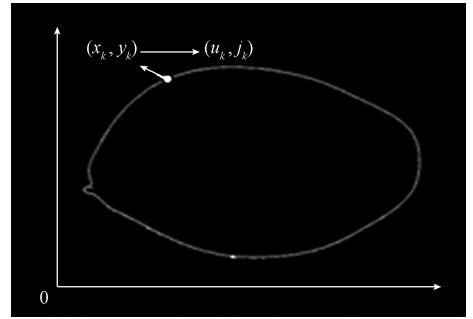


图 5 轮廓坐标转换示意

Fig. 5 Contour coordinate transformation

$$s(k) = u(k) + jv(k) \quad (3)$$

式中:  $k = 0, 1, \dots, N - 1$ 。

为了得到边界的描述,对序列  $s(k)$  做离散傅里叶变换,如下:

$$s(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s(k) e^{-j\frac{2\pi\omega k}{N}} \quad (4)$$

式中:  $\omega = 0, 1, \dots, N - 1$ 。

傅里叶描述子具有旋转和平移和不变性<sup>[18]</sup>,本文提取前 8 个傅里叶描述子作为轮廓的近似表示。

根据上文获得的二值图像,进行粒子分析,可以获得最小外接矩形的长宽像素数,根据该位置下 CCD 相机的标定,可以获得实际的长度,长宽获取如图 6 所示,并根据该二值图像可计算形状的 Hu 不变矩。

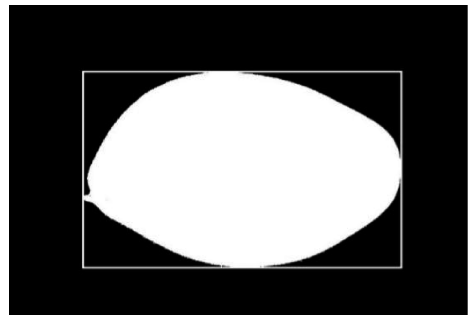


图 6 外接矩形长宽获取示意

Fig. 6 Sketch of length and width of external rectangle

Hu 不变矩是由学者 Hu 利用原点矩  $m_{pq}$ 、中心距  $\mu_{pq}$ 、归一化的中心距  $y_{pq}$  如式(5)~(7)所示,线性组合构造的 7 个不变矩,用于反映轮廓特征。

$$m_{pq} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x^p y^q f(x, y) \quad (5)$$

$f(x, y)$  为该二值化图像值,为 0 或者 1。

$$\mu_{pq} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (x - x_0)^p (y - y_0)^q f(x, y) \quad (6)$$

其中,  $x_0, y_0$  为图像的中心坐标。

$$y_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{u_{00}^r} \quad (7)$$

圆形度是用来描述物体的轮廓和圆形的相似程度,圆形度计算公式如下:

$$e = \frac{4\pi S}{C^2} \quad (8)$$

式中: $S$  为该形状的像素面积; $C$  为形状的像素周长。本例在计算周长时采用 8 连通的像素值,对于‘直立’的芒果圆形度较低,而‘平躺’的芒果,圆形度较高。

由于上述获取的特征变量包含外接矩形长于宽、7 个傅里叶描述子、8 个 Hu 不变矩以及圆形度总计 18 个特征,且这些特征之间可能相互关联,相互影响,这就需要和数据进行降维处理。使用主成分分析法,提取一部分线性不相关的量就能解释原始数据的大部分信息。主成分的贡献率如图 7 所示,两种位姿下提取前 85% 以上方差的主成分。

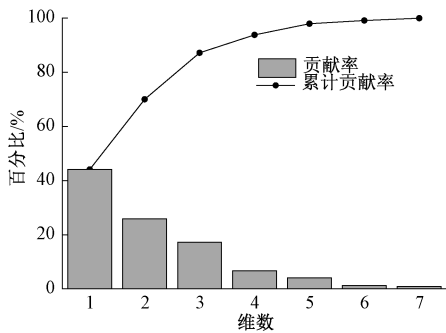


图 7 主成分与贡献率

Fig. 7 Principal component and contribution rate

### 2.3 芒果不同位姿检测

根据所采用的 100 个芒果,每个芒果进行两个位姿信息获取之后,一共获得了 200 个位姿信息。其中 160 个作为预测集,提取前 3 个主成分为模型建立,其余 40 个作为校证集来验证模型准确度。采用判别分析中常用的 Fisher 判别,寻找使两个位姿之间区别最大,而每个位姿内部的离差平方和最小的线性判别函数。判别结果如图 8 所示,其中类型 1 为芒果‘直立’位姿,类型 2 为芒果‘平躺’位姿。

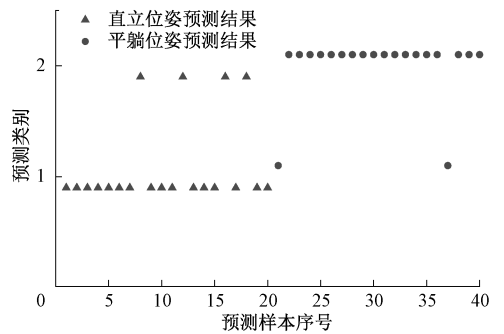
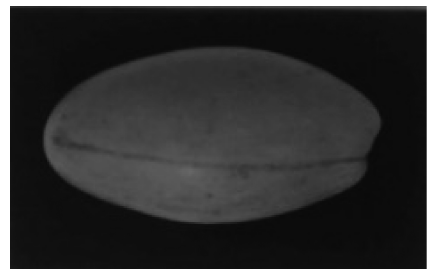


图 8 直立芒果判别结果

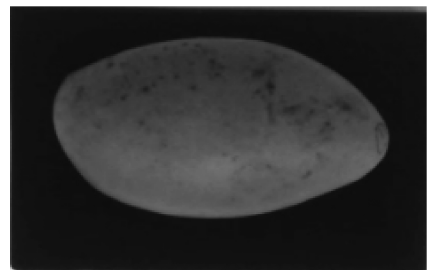
Fig. 8 Distinguish of upright mango

结果显示,芒果位姿检测的两种准确率分别为 80% 和 90%,平均准确率为 85%。其中的一个误判样品如图 9 所示,这可能是因为产生误差的样本实体其外形相比其他芒果较大导致的过渡饱满,使得外部轮廓曲线和其他样品相比差距过大而产生误判。



(a) 直立位姿俯视图

(a) Upright overhead picture



(b) 平躺位姿俯视图

(b) Lying overhead picture

图 9 误判样品两种位姿

Fig. 9 Position of misguide sample

因此,在位姿检测中加入了芒果外表面的三维信息,利用获取的芒果表面最高点的高度值与上文中获得的芒果外接矩形的长宽的比值作为两个新的特征参数,将这总计 20 个特征进行主成分分析,主成分与贡献率如图 10 所示。与不加入 3D 信息的主成分对比发现,前两个主成分的贡献率显著增加,只需提取两个主成分便能解释将近 90% 的方差,且在第 1 个主成分中,经过计算,最高点高度与芒果外接矩形的长的特征系数占据了 12%,而与宽的比值占据了 55%,考虑到芒果的实际形态,在尺寸上

两种位姿主要在宽和高度的差异,这与上述主成分系数的差异相对应。这足以说明 3D 信息在芒果位姿检测中起着举足轻重的作用。

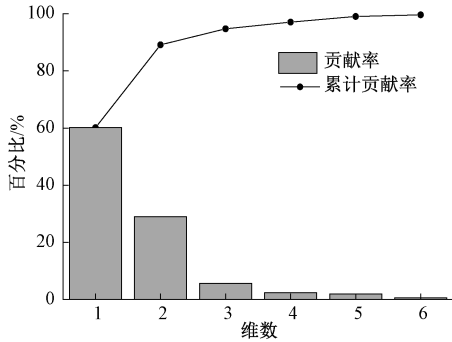


图 10 加入 3D 信息后主成分与贡献率

Fig. 10 Principal component and contribution rate

利用 Fisher 判别重新对位姿进行判断,判断结果如图 11 所示。

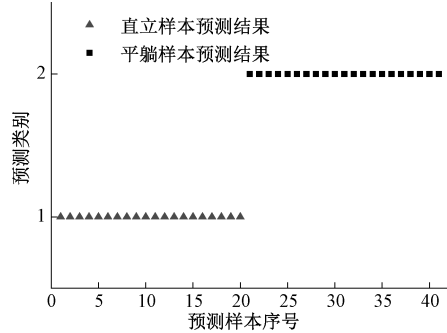


图 11 加入三维信息后位姿判别结果

Fig. 11 Situation distinguish result with 3D information

在将特征参数的选择从二维扩展到三维时,位姿判断的准确率达到了 100%,芒果的外表面深度信息能够充分修正由于实体过大或者过小而带来的轮廓差异造成的误判。

### 2.4 基于 3D 结构光系统的芒果体积预测

已有研究是利用 CCD 相机获取芒果的二维投影的像素面积,利用该像素面积数建立回归模型来对体积和质量进行预测,实验平均准确率 92%。但是这一预测并没有引入表面高度的信息,如果投影面积相近的芒果,但是饱满度差异大,则体积预测误差大。

芒果作为一个不规则体,没有确定的公式来对体积进行计算,利用微积分的思想,在表面上将芒果分成无数个小长方体,每个小长方体的体积之和为芒果的体积,如式(9)所示。

$$V = \sum dV = \sum ds \times h \quad (9)$$

式中: $h$  为每个点的高度信息; $ds$  为每个小长方体的底

面积。

结构光相机和参考面的相对位置不变时,表面高度点越多像素投影面积越大,而芒果在  $Z$  轴上的高度决定着测的深度点的深度值。芒果的边缘处由于高度梯度变化太大,表面粗糙发生漫反射,发出的红外光无法由接收器接收,会出现高度为 0 的无效点,如图 12 所示(画圈部分)。因此在进行体积预测时仅仅依靠高度信息是有一定的误差的,而由 CCD 相机生成的图像不会产生无效点,这就需要上文提到的投影的像素面积作为补正。样品在直立时,表面梯度较大,投影面积小,投影面积对于体积的影响较小;而平躺时,表面梯度小,不同样品表面深度基本上差异不大,样品体积受投影面积的影响显著。

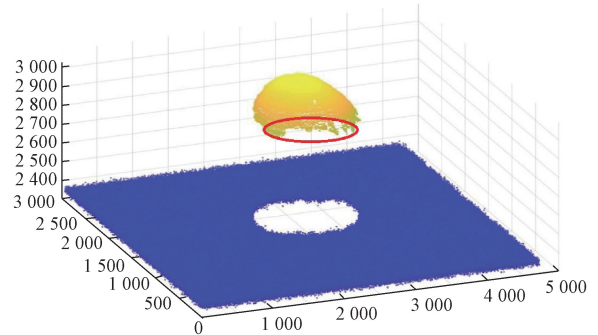


图 12 3D 信息高度无效点示意

Fig. 12 3D information height invalid point indication

本文分别提取两种位姿下的芒果表面高度总和与投影像素面积数作为特征参数,利用常用的 SVM 模型寻找最优超平面<sup>[19-20]</sup>,建立两种位姿下对应位姿的芒果体积预测模型,并与现有研究进行对比。结果如图 13、14 所示,在两种位姿下,不使用深度信息时,有几个样品的体积误差很大,这是由于仅仅使用 CCD 相机进行位姿检测,位姿预测错误进而使用的错误的预测模型对体积进行预测,误判的时候,样品像素投影面积与正常位姿相比区别较大,进而对提及预测产生很大的影响。

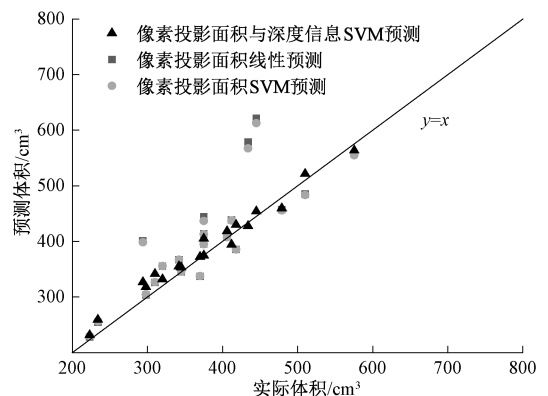


图 13 芒果直立状态体积预测模型对比

Fig. 13 Volume prediction model comparison of upright mango

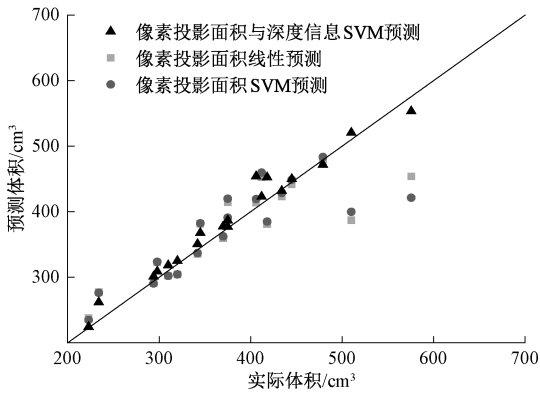


图 14 芒果平躺状态体积预测模型对比

Fig. 14 Volume prediction model comparison of lying mango

比较几种方式与  $y=x$  这条直线所确定的体积的相关系数,在直立位姿下,本文所提到的方法决定系数远大于前人的方法为 0.95,而仅仅使用投影面积的传统方法线性模型决定系数仅仅 0.74。在平躺下体积预测相关系数也较高为 0.96。平躺时决定系数提高不如直立时提高显著,这可能是在平躺状态下表面高度梯度相对较小,但仍存在一定的梯度,在直立时,表面梯度大,高度信息对体积的影响的效果显著。图 15、16 所示为芒果两种位姿下正确预测位姿的情况下体积预测的误差曲线,根据误差曲线可以看出不管芒果在直立和平躺位姿下,计算的体积与真实的体积误差率均较小,平均误差率均小于 5%,分别为 4.2% 和 3.6%,其中有几个样品在体积预测时的误差较大,为 10% 左右,这是因为样品不对称度较大,这使得投影面积和高度测量产生误差,使用 3D 结构光系统预测芒果的体积相比仅仅使用二维投影面积的准确率提升较大。使用本文所采用的方法来进行位姿检测以及体积预测,具有良好的准确率,能够为芒果快速体积分级提供参考。

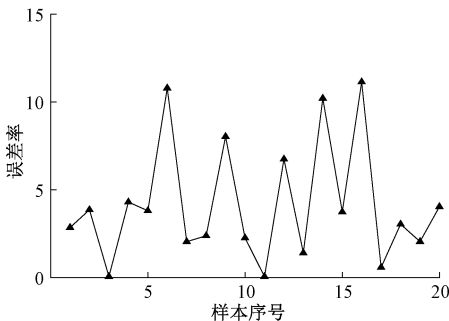


图 15 直立位姿下体积预测误差

Fig. 15 Volume predict error of upright mango

### 2.5 芒果的质量预测

芒果在采后贮存时,由于水分的散失以及呼吸作用

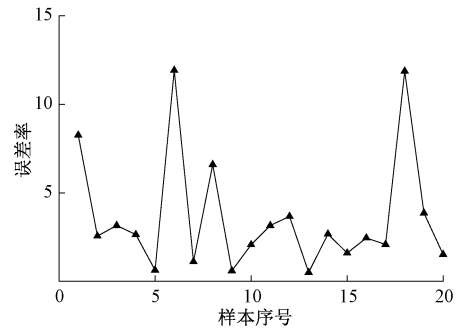


图 16 平躺位姿下体积预测误差

Fig. 16 Volume predict error of lying mango

消耗有机物,芒果的质量不断变化而且它的导致芒果的密度是会不断变化的,对芒果质量的预测产生了一定的困难,想要准确的预测芒果的质量,就首先需要知道芒果的密度,目前对于芒果密度的测量基本上均为称出体积和质量后对密度进行计算,相对来说比较费时费力。

对同一天采摘的 80 个芒果样本的密度进行统计,该批芒果的密度均处于 0.98~1.01,且基本符合正态分布,因此本文将芒果的密度定为占比最多的 0.99,利用预测出的体积来对质量进行预测,在两种位姿下的预测结果如图 17 所示,和直线  $y=x$  的决定系数分别为 0.97 和 0.95,这说明两种位姿下对于质量的预测结果均具有良好的相关性,预测质量和实际质量差距不大,说明对于采摘时间接近的样本,固定密度来对质量进行预测是可行的。

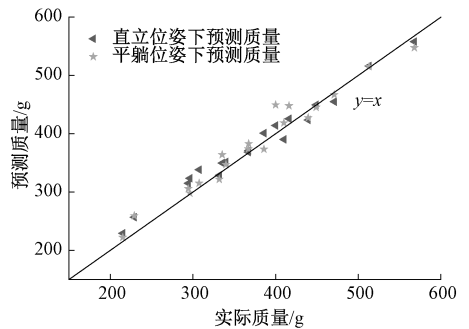


图 17 两种位姿下质量预测模型

Fig. 17 Mango quality mode of two situation

## 3 结论

本文搭建了一个基于机器视觉的 3D 结构光系统,利用该系统对生产线上的芒果进行图像处理、三维重建以及对芒果的体积、质量进行非线性回归分析并于前人的研究进行对比。利用外部轮廓特征以及深度信息识别自然状态下芒果的两种位姿,该系统识别的准确率为 100%,之后根据不同的位姿建立相应的 SVM 模型并对

体积进行预测,结果显示该系统对两种位姿的体积预测的误差分别为4.2%和3.6%,决定系数分别为0.95和0.96,相比仅仅使用二维投影对体积进行预测,相关系数显著上升,整体误差率下降。最后利用预测的体积,假定一个固定的密度来对质量进行预测,质量预测的准确度良好,决定系数均大于0.95。对于之后的研究,可以研究芒果表面深度和纹理、颜色等信息和密度的关系,能够对同一品种任意采摘时间与贮存时间的芒果进行质量预测。

## 参考文献

- [1] KHOJE S, BODHE S. Comparative performance evaluation of size metrics and classifiers in computer vision based automatic mango grading[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2013, 61(9): 1-7.
- [2] LONG N, THINH N T. Using machine learning to grade the mango's quality based on external features captured by vision system[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(17): 5775.
- [3] MON T, ZARAUNG N. Vision based volume estimation method for automatic mango grading system [J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 198: 338-349.
- [4] WANG Z W, LI B. Use of fuzzy neural network in industrial sorting of apples [J]. *Instrumentation*, 2019, 6(4): 37-46.
- [5] LORENTE D, ALEIXOS N. Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment [J]. *Food Bioprocess Technology*, 2012, 5(4): 1121-1142.
- [6] ABDULLAH M Z, SHAKAFF A Y M D, IBRAHIM F M, et al. Shape and weight grading of mangoes using visible imaging[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 115:51-56.
- [7] NANDI C, TUDU B, KOLEY C A. Machine vision technique for grading of harvested mangoes based on maturity and quality[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(16): 6387-6396.
- [8] WANG W L, LI C Y. Size estimation of sweet onions using consumer-grade RGB-depth sensor[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 142: 153-162.
- [9] RASHID A, AMIR F. Automated asian fruit grading system using stereo vision technique [C]. *Journal of Physics Conference Series*, 2020, 1535: 012007.
- [10] 石磊,朱洪海,于雨,等. 基于双目立体视觉的波浪参数遥测方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(3): 99-104.
- SHI L, ZHU H H, YU Y, et al. Research on wave parameter telemetry based on binocular stereo vision [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33 (3): 99-104.
- [11] 张驰,陈立平,黄文倩,等. 基于编码点阵结构光的苹果果梗/花萼在线识别[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 1-9.
- ZHANG CH, CHEN L P, HUANG W J, et al. On line recognition of apple stem / calyx based on coded lattice structured light [J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2015, 46 (7): 1-9.
- [12] 李文涛,王培俊,陈亚东,等. 钢轨全轮廓线结构光双目视觉测量系统标定[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(3): 203-211.
- LI W T, WANG P J, CHEN Y D, et al. Calibration of structured light binocular vision measurement system for rail full contours [J]. *Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(3): 203-211.
- [13] LIU X, ZHAO D, JIA W, et al. A detection method for apple fruits based on color and shape features[J]. *IEEE Access*, 2019 (7): 67923-67933.
- [14] 白广东,张禹,孙建建,等. 基于视觉的麻花钻头自动定位系统研究[J]. *国外电子测量技术*, 2020, 39(5): 81-85.
- BAI G D, ZHANG Y, SUN J J, et al. Research on automatic positioning system of twist drill based on vision [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2020, 39 (5): 81-85.
- [15] 胡媛敏,张寿明. 基于机器视觉的奶牛体尺测量[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(20): 115-120.
- HU Y M, ZHANG SH M. Dairy cow body measurement based on machine vision [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43 (20): 115-120.
- [16] GHANI M A. Apple grading system based on weight and colour[J]. *Instrumentation*, 2020, 7 (4): 14.
- [17] HAYTHEM B, MOHAMED H, MARWA C, et al. Fast generalized Fourier descriptor for object recognition of image using CUDA [C]. *Computer Applications & Research*, IEEE, 2014.
- [18] YE Y X, BRUZZONE L, SHAN J, et al. Fast and robust matching for multimodal remote sensing image registration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(11): 9059-9070.
- [19] 周建民,陈超,涂文兵,等. 红外热波技术、有限元与SVM相结合的复合材料分层缺陷检测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(3): 29-38.
- ZHOU J M, CHEN CH, TU W B, et al. Composite layer defect detection method based on infrared heat wave technology, finite element and SVM[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(3): 29-38.

[20] 净亮,邵党国,相艳,等. 基于支持向量机的自适应均值滤波超声图像降噪[J]. 电子测量与仪器学报, 2020,34(3): 6-13.

JING L, SHAO D G, XIANG Y, et al. Adaptive mean filtering based on support vector machine for ultrasonic image noise reduction [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34 (3): 6-13.

作者简介



**周朔**,2019 于中北大学获得学士学位,现为江南大学硕士研究生,主要研究方向为食品的图像处理与无损检测。

E-mail: 787135160@qq.com

**Zhou Shuo** received his B. Sc. degree from North University of China in 2019. He is

currently a M. Sc. candidate at Jiangnan University. His main research interests include image processing and non-destructive testing of food.



**宋飞虎**,2008 年与南京理工大学获得学士学位,2014 年与东南大学获得博士学位,现为江南大学副教授,主要研究方向为食品的图像处理与无损检测。

E-mail: 214191024@qq.com

**Song Feihu** received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2008, and Ph. D. degree from Southeast University in 2014. He is currently an associate professor at Jiangnan University. His main research interests include image processing and non-destructive testing of food.