

基于多轮廓模型的红枣体积和表面积在线测量方法

吴明清^{1,2}, 弋晓康², 罗华平², 李传峰², 唐晓燕³, 陈坤杰^{1*}

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300;

3. 江苏省农业农村厅绿色食品办公室, 南京 210036)

摘要:为快速测量红枣的体积和表面积, 给红枣三维信息的分级装备开发提供依据。该文搭建图像采集装置, 由工业相机连续拍摄旋转圆盘上物体的二维图像, 编写图像处理软件提取图像的二维轮廓特征, 再由二维图像的轮廓构建三维多轮廓模型, 测量模型的体积和表面积。探讨不同轮廓间角($4^{\circ}\sim 15^{\circ}$), 不同投影高度(0.1~0.5 cm)和不同直径(24~42 mm)对多轮廓模型测量体积和表面积的影响。试验结果表明, 多轮廓球体模型的直径为固定值, 体积的相对误差随轮廓间角和投影高度的增大而增大, 表面积相对误差随轮廓间角和投影高度的增大而减小, 最小相对误差分别为6.0%和1.0%; 多轮廓球体模型的轮廓间角和投影高度为确定值, 模型的体积和表面积相对误差随直径的变化不明显, 但直径越小误差越大, 体积和表面积相对误差的均值分别为9.1%和4.34%; 多轮廓红枣模型的轮廓间角和投影高度为确定值, 模型体积的平均相对误差随等级的增大而增大, 表面积随等级变化不明显, 其中体积的均方根误差和平均相对误差的均值为2.45 cm³和10.2%; 表面积均方根误差和平均相对误差的均值为3.65 cm²和7.09%。红枣多轮廓模型测量方法为红枣分级装备的开发提供技术参考。

关键词:机器视觉; 模型; 分级; 红枣; 多轮廓模型; 体积; 表面积

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.035

中国分类号: TP391, S37 文献标识码: A 文章编号: 1002-6819(2019)-19-0283-08

吴明清, 弋晓康, 罗华平, 李传峰, 唐晓燕, 陈坤杰. 基于多轮廓模型的红枣体积和表面积在线测量方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 283—290. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.035 <http://www.tcsae.org>

Wu Mingqing, Yi Xiaokang, Luo Huapin, Li Chuanfeng, Tang Xiaoyan, Chen Kunjie. On-line measurement method for volume and surface area of red jujube based on multi-contour model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19): 283—290. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.035 <http://www.tcsae.org>

0 引言

新疆因光照丰富, 降雨量少, 昼夜温差大的独特环境而出产优质红枣^[1]。近年来, 新疆红枣产量随种植面积逐年扩大, 红枣已经成为新疆特色农业经济的支柱产业, 红枣产业的快速发展对红枣采后加工的技术和设备提出了更高的要求^[2]。分级是红枣采收后贮藏、加工及销售过程中的重要环节, 同时也是提高红枣质量和商品化价值的重要手段。目前红枣主要的分级方法有人工、机械和机器视觉技术。人工分级的效率和精度都较低; 机械分级克服了人工分级缺点, 极大的提高了分级效率和质量, 但机械分级只能根据红枣的长短径进行分级, 分级指标比较单一, 不能够真实反映红枣的形状^[3]。形状是影响红枣等级和价格的重要因素。机器视觉技术利用图

像传感器, 获取红枣的大小、形状、颜色、纹理和表面缺陷等信息, 实现红枣的分级^[4-15]。新疆干制红枣的品种有骏枣和灰枣, 其中骏枣长径、短径和长度各不相同。由于二维图像只能提供红枣的两维信息, 而且还因视角变化, 造成几何形状和投影面积的差异^[16], 会降低红枣的分级精度。

体积和表面积都是农产品重要的物理特征, 准确获取体积和表面积对农产品的大小分级有重要的意义^[17]。但传统类球体体积的测量多采用排水法测量, 表面积采用削皮或切片的方法进行测量^[18]。效率低、无法实现实时测量, 无法用于农产品的在线分级。近年来, 已有不少文献研究不规则农产品的体积和表面积的测量方法。李景彬等^[19]将红枣近似成类圆柱体, 提取红枣二维图像特征参数得出类圆柱体体积, 建立图像体积与质量的线性回归方程。Clayton等^[19]分别以球体和椭球体为模型估算4种苹果的表面积, 采用削皮测量苹果的表面积, 两种模型分别低估了实际表面积15%和18%。Uyar等^[20]通过三维激光扫描仪获取农产品三维数字图像的体积和表面积, 分别计算鸡蛋和球体的体积和表面积, 其中球体体积和表面积的计算误差小于1%, 鸡蛋测体积计算误差在

收稿日期: 2018-11-17 修回日期: 2019-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(31560479、11464039)

作者简介: 吴明清, 博士生, 塔里木大学讲师, 主要从事农产品检测与分析研究。Email: 290679570@qq.com

*通信作者: 陈坤杰, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品加工与检测技术研究。Email: kunjiechen@njau.edu.cn

1%~3.15%，鸡蛋测表面积计算误差小于1%。熊妮娜等^[21]应用三维激光扫描仪系统，通过扫描获取单株树木的三维空间的点云数据，将树冠近似为多个圆台体，求他们的体积之和来计算树冠体积。龚爱平等^[22]利用三维线框模型图像处理测量不规则球类形状的农产品的体积和表面积，用所提及方法、排水法和扫描图像处理法对不规则的柑橘、苹果和梨进行体积和表面积测量，结果显示3种方法的相关系数大于0.98；在测量精度方面，当图像数量大于10幅时，测量精度大于98%，测量数量小于7幅时则精度下降明显，测量系统能在5 s内完成被测物体的体积和表面积的测量。但是，目前国内针对红枣体积和表面积检测的研究几乎处于空白，根据体积进行红枣分级的研究还没有相关报道。

本文搭建红枣图像采集的简易装置，利用图像处理技术进行红枣图像的实时采集和特征提取，再通过特征参数构建红枣的三维模型并计算模型的体积和表面积，为将来开发基于图像技术和体积参数的红枣分级设备提供理论和技术基础。

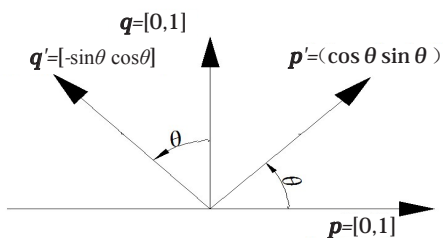
1 测量原理

1.1 二维轮廓与三维轮廓空间的映射推导

三维轮廓模型是表示物体几何形体的模型，是计算机中对物体的形状可视化表现的一种方式，模型由对象轮廓的边缘点按映射关系转换得到，其特点是存储量小、速度快、操作灵活和处理时间较短^[22]。要建立被测物体的三维轮廓模型，需要对旋转过程的物体规定时间内按等时间间隔测量采集 N 副图像，完成等间隔角度图像的采集，对采集的到图像进行处理，提取图像边缘轮廓点的坐标，按以下原理进行映射转换。

在二维空间，假设向量 p, q 围绕原点旋转，角度为 θ ，顺时针为正，逆时针为负。图1展示向量 p, q 绕原点旋转，得到新向量 p', q' ，构造矩阵如式(1)所示：

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} p' \\ q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (1)$$



注： p, q, p', q' 为向量， θ 为旋转角度， $(^\circ)$ 。

Note: p, q, p', q' are vectors and θ is rotation angle, $(^\circ)$.

图1 二维向量原点旋转图

Fig.1 Two-dimensional vector origin rotation diagram

图像轮廓点的坐标点围绕着坐标系 z 轴进行旋转，同一点旋转前后的关系式如(2)所示：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 (x, y) 为旋转前图像坐标的位置； θ 为图像的旋转角， $(^\circ)$ ； (x', y') 为旋转后图像坐标的位置。设坐标系

(xoy) 内建立空间直角坐标系 xyz ，空间直角坐标系 xyz 转动后形成新的直角坐标系 $x'y'z'$ ，如图2所示，转换公式如(3)所示。

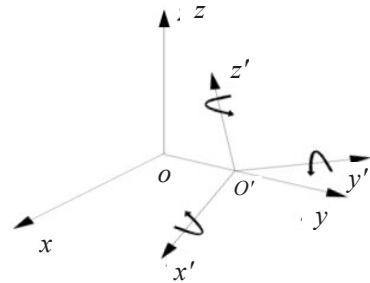


图2 三维旋转坐标系

Fig.2 Three-dimensional rotational coordinates

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + R_x(\phi) \times R_y(\alpha) \times R_z(\theta) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $(x, y, z)^T$ 为空间直角坐标系中任意一点； $(x', y', z')^T$ 为空间直角坐标系 $x'y'z'$ 中的坐标， $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$ 为空间直角坐标系 xyz 到空间直角坐标系 $x'y'z'$ 的平移参数。其中 $R_x(\phi), R_y(\alpha), R_z(\theta)$ 为空间直角坐标系 xyz 到空间直角坐标系 $x'y'z'$ 的旋转矩阵， ϕ, α, θ 表示红枣轮廓将其围绕 x, y, z 轴旋转角度 $(^\circ)$ ，如(4)、(5)、(6)所示：

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_y(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

在公式(4)中，假设当坐标点围绕 x 轴进行旋转，物体不发生位移， $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T = (0, 0, 0)^T$ ，其中 $(x, y, z)^T$ 表示坐标点在平面直角坐标系 zoy 上的坐标， $(x', y', z')^T$ 表示轮廓上的像素点在平面直角坐标系 $z'o'y'$ 上的坐标。

1.2 多轮廓体积和表面积的测量原理

多轮廓三维点云模型如图3所示，两个相邻轮廓的间角为 $\Delta\theta$ ，轮廓个数用 N ，轮廓的个数 $N=180^\circ/\Delta\theta$ ，假设轮廓个数 $N=20$ ，则轮廓在 z 轴 x 心上的投影如图3a、b所示， r_i 和 r_{i+1} 为投影面轮廓边缘点和轮廓轴心点之间的距离，投影面轮廓边缘相邻两点 A, P 和轴心点 Z_0 构成三角形 $A=\Delta Z_0PA$ ，相邻轮廓点和轴心点 Z_0 形成的投影面积可以用式(7)表示：

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} (A_i + A_{i+1} + A_{i+2} \dots A_{i+n}) \quad (7)$$

式中 S 为轮廓点的投影面积， cm^2 ， $A_i, A_{i+1}, A_{i+2} \dots, A_{i+n}$ 为投影面轮廓边缘相邻两点和轴心 Z_0 点组成三角形的面积， cm^2 ； n 为轮廓点形成三角的个数。在图3c中，在 Z 轴方向，相邻轮廓投影面形成一个椭圆台，多轮廓模型的体积可以用式(8)表示。

$$V = \int_a^b S(h) dh \approx \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i + \sqrt{S_i S_{i+1}} + S_{i+1}}{3} \right) \Delta h \quad (8)$$

式中 V 为多轮廓模型的近似体积, cm^3 ; ab 为多轮廓模型纵轴的长度, cm ; S_i, S_{i+1} 为第 $i, i+1$ 层投影面的面积, cm^2 ; Δh 为相邻投影面的高度, cm 。

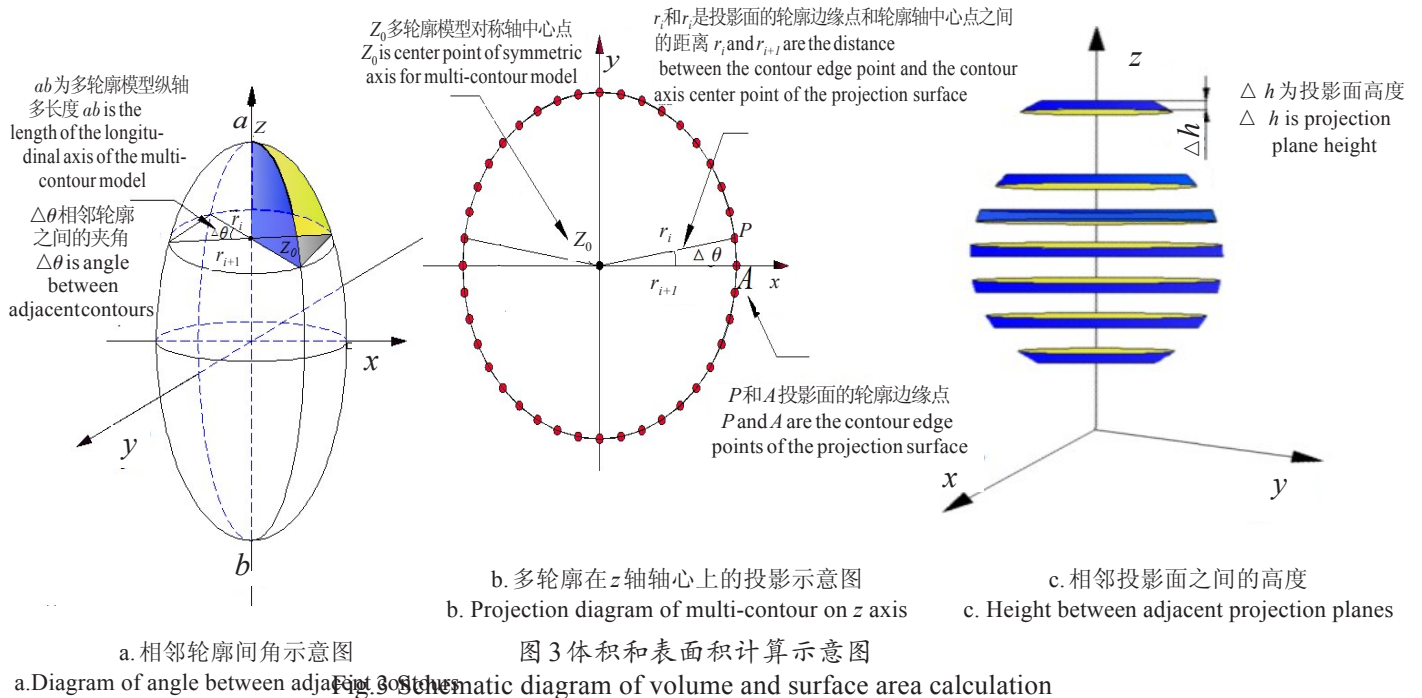
在图3b中,轮廓投影面的边缘点的周长可以用式(9)表示。

$$C = \sum_{i=1}^{n-1} (L_i + L_{i+1} + L_{i+2} \dots L_{i+n}) \quad (9)$$

式中 C 为投影面积的周长; $L_i, L_{i+1}, L_{i+2}, \dots, L_{i+n}$ 为轮廓边缘相邻两点的距离, cm , n 为边缘轮廓点的个数。在图3c中,在 z 轴方向,相邻轮廓投影面形成一个椭圆台,多轮廓模型的近似表面积可以用式(10)表示。

$$P = \int_a^b C(h) dh \approx \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i + C_{i+1}}{2} \right) \Delta h \quad (10)$$

式中 P 为多轮廓模型的近似表面积, cm^2 ; C_i, C_{i+1} 为第 $i, i+1$ 层投影面轮廓周长, cm , Δh 为相邻投影面的高度,近似等于椭圆台的母线的长度, cm 。



1.3 图像的分割和点云处理

本文在 VS2010 开发平台下采用 VC++ 编程语言,结合 PCL(Point Cloud Library 1.6) 点云库和 OpenCV 跨平台计算机视觉函数库(Open Source Computer Vision Library 3.0)对图像进行处理。图像分割的目是将目标从图像中精确的分割出来,对提取的结果进行滤波去噪,提高测量的精度^[23]。原始图像如 4a 所示。相机拍摄过程受到白色背景,灯光的影响,图像存在噪音,需要对灰度化图像进行滤波处理,本文应用加权平均法将彩色图像转换为单色图像方法进行灰度化^[24],计算公式为 $\text{Gray} = 0.299R + 0.587G + 0.114B$, 式中 R, G, B 分别代表彩色图像 3 个基本单色光红色、绿色、蓝色的强度等级,其取值范围均为 0~255,灰度化效果如图 4b 所示。均值滤波法^[25]是一种把相邻像素的相应分量值的平均值作为中心点像素相应分量值的方法,本文采用均值滤波 (5×5 算子)的方法对红枣图像进行滤波操作,滤波效果如图 4c 所示。图像的二值化就是将图像的像素点灰度值设置为 0 或 255,将整幅图呈现出明显的黑白效果,本文采用 Otsu 算法,该算法进行二值化具有简单,时效性高,能够兼顾边缘细节和分割效果的优点^[26],二值化效果如图 4d 所示。二值化分割后,图像的边缘存在不连续现象,影响边缘轮廓的提取,应用开运算法使图像边缘光滑,应用腐蚀算法增加连通区域,效果如图 4e f 所示。轮廓边缘坐标的提取方法分为两步:1)首先应用

Opencv 中的 findContours() 函数对图像轮廓进行检查,检索模式为 RETR_EXTERNAL,该模式只检索最外层轮廓;模式标识符选 CHAIN_APPROX_NONE,其作用获取轮廓边缘每一个像素的坐标位置;2)应用 Opencv 中的 drawContours() 函数绘制外轮廓,函数中参数 thickness 来控制轮廓线的粗细,一般设置为 1,效果如图 4g 所示。轮廓边缘像素点是二维坐标,需要将二维坐标转换为三维坐标^[26];具体操作如下,构建一个三维结构体 CvPoint3D32f(float x, float y, float z),将二维坐标存储到三维结构体中;再将三维结构体 CvPoint3D32f 的数据类型转化为 PointXYZ 点云类型,存储为 .pcd 文件格式^[27],效果如图 4h 所示。由于图像采集过程,不同间隔角度的轮廓坐标都有一定的差异,点云的坐标系不同,需要对点云进行平移到统一的坐标系中,即采用 getMin-Max3D 最小包围盒函数计算轮廓坐标中心 (x, y, z) ,轮廓点坐标中心 (x, y, z) 与原点坐标 $(0, 0, 0)$ 位置相减就实现轮廓平移,效果如图 4i 所示。轮廓以 Z 轴为旋转中心按二维轮廓与三维轮廓空间的映射关系转换为多轮廓模型^[28],效果如图 4j 所示,模型中点云十分密集,存在冗余,无法有效运算,降低了轮廓模型体积和表面积的计算速度,需要对多轮廓点云模型进行下采样操作。本文采用体素栅格^[29]的点云下采样方法,设置素网格立方体的大小为 $0.1 \text{ cm} \times 0.1 \text{ cm} \times 0.1 \text{ cm}$,如图 4k 所示。

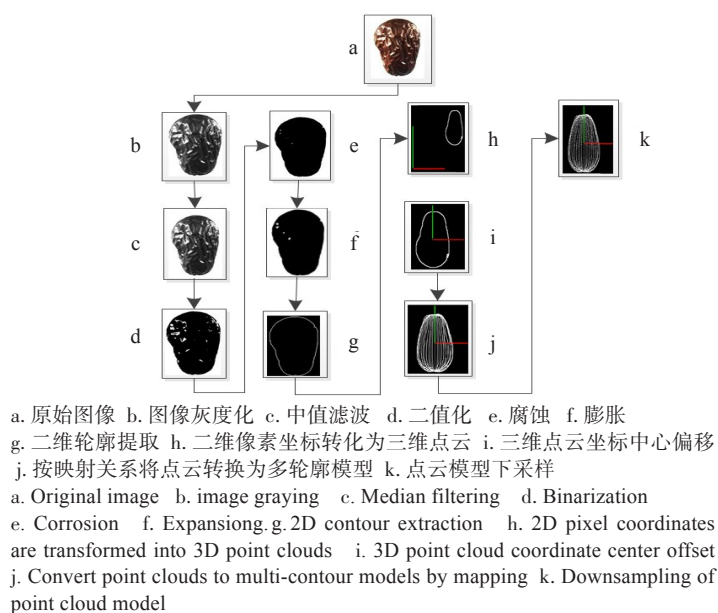


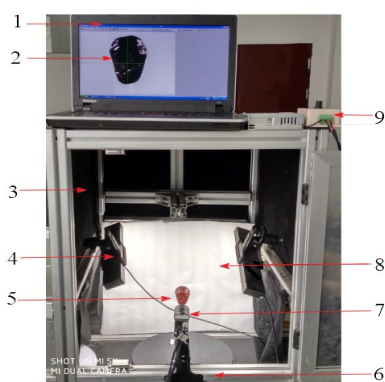
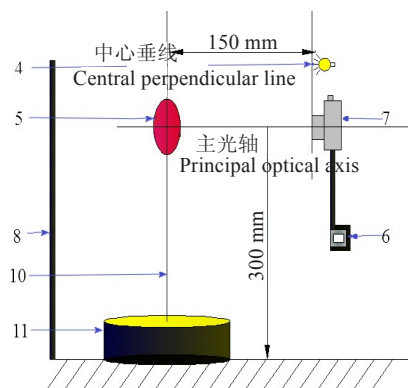
图4 图像分割和处理过程

Fig.4 Image segmentation and processing

2 试验材料与装置

2.1 试验样品

试验样本为阿克苏骏枣, 购买于2018年10月, 采用排

a. 试验装置
a. Experiment deviceb. 试验原理图
b. Experiment principle diagram

1. 计算机 2. 红枣图像 3. 暗箱 4. 光源 5. 红枣样本 6. 边框横梁 7. 相机及镜头 8. 白色背景 9. 光源控制器 10. 钢针 11. 旋转台

1. Computer 2. Red jujube image 3. Dark box 4. Light source 5. Red jujube sample 6. Frame beam, 7. Camera and lens 8. White background 9. Light source controller 10. Steel needle 11. Rotating table

图5 图像采集装置

Fig.5 Image acquisition device

2.4 红枣图像的采集方法

用户界面用MFC(Microsoft Foundation Class)进行界面设计, 该用户操作采用软触发, 定时器控制, 在红枣的背后放置白板, 减少复杂环境的干扰。镜头到红枣的距离150 mm, 主光轴高度300 mm, 在图像采集时, 首先将红枣样本果蒂部位刺插在针尖上, 启动旋转按钮, 调试光源和焦距, 当样本清晰呈现在相机镜头正前方, 触发相机。30 s内分别得到样本的图像的帧数为12, 15, 20, 30, 45; 间隔角度分别为15°, 12°, 9°, 6°, 4°; 采集角度范围为0°~180°, 连续采集图像, 图像的存储格式为JPG。

3 结果与分析

3.1 排水法和图像法的实际值测量及标定

本文采用排水法测量红枣体积, 操作过程如下: 将

水法测量红枣的体积, 将红枣按体积大小划分成5个等级, 如表1所示, 每个等级取20个红枣, 共计100个红枣样本备用。

2.2 试验仪器和设备

电子数显游标卡尺(中国桂林量具刃具有限责任公司, 精度: 0.01 mm), 直嘴溢水烧杯, 量筒(量程: 100 mL, 精度: 1 mL), 锡纸, 剪刀, 记号笔, 密封袋, 标签纸, 镊子等。

2.3 试验平台的设计

自主开发一套机器视觉图像采集装置, 如图5所示, 试验装置由工业相机, 计算机, 旋转台, 光源, 暗箱等组成。相机采用维视MV-EM510C型工业相机及4.0 mm焦距镜头, 像素尺寸 $3.45 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$, 帧率15 帧/s, 曝光时间为30~5 000 000 μs , 以太网与计算机相连, 相机通过云台夹固定在暗箱边框, 水平朝向旋转台中心, 距离被测物体约300 mm; 照明光源采用两个LED灯; 旋转台采用宝康隆NA250电动旋转台, 转速60 s/圈, 旋转角度360°, 旋转台半径为125 mm, 在旋转台的中心固定一根长度为160 mm的钢针, 钢针表面涂为白色。

蒸馏水倒入直嘴溢口烧杯, 直至直嘴溢口烧杯不漏水为止; 用镊子夹住红枣浸入烧杯中使水溢出到100 mL量筒中, 读出量筒中水的体积, 即红枣的体积, 每个样本测量3次, 取平均值; 再用平均值减去镊子的体积即为红枣的体积。本文图像的处理的方法是用锡纸包裹红枣表面, 用剪刀剪切锡纸包裹的多余部分, 将锡纸剥离平放置相机镜头的黑色A4纸上, 采集俯视图如图6所示, 图中白色区域为红枣表面锡纸图像。在图像采集过程中, 相机实际成像与理想成像之间存在非线性光学变形, 为了减少系统误差, 提高系统测量的精度, 需要对系统进行标定。本文参照[30-31]提出的标定方法, 提取图像的特征向量为像素单位, 将其转换为图像的实际值。在系统硬件参数、物距确定的情况下, 图像的物理尺寸和像素尺寸比值固定不变^[32], 如式(11)所示。



图 6 红枣表面锡纸图像采集

Fig.6 Tin paper on red jujube surface image acquisition

$$A=\frac{L_r}{L_p}$$
 (11)

式中 A 为比例系数, L_r 为物理尺寸, L_p 为像素尺寸; 实际面积=0.005 6×像素尺寸, 实际体积=0.000 42×像素尺寸, 应用 Matlab 中的 bwarea 函数统计白色区域面积。

3.2 不同等级红枣的体积和表面积统计分析

将红枣按体积大小划分为 5 个等级, 每个等级 20 个红枣, 计算各等级的最小值、平均值、最大值、标准偏差和变异系数。不同等级红枣的实际体积和表面积统计分析结果如表 1 所示, 体积的标准偏差在 1.09~2.05 之间, 变异系数在 6%~12% 之间; 表面积的标准偏差在 2.56~2.88 之间, 变异系数在 4%~10% 之间。

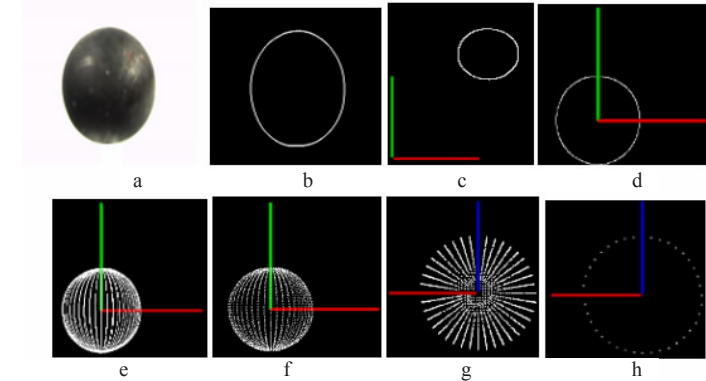
表 1 不同等级红枣实际值统计分析
Table 1 Different grades of red jujube actual value statistical analysis

特征参数 Characteristic pa- rameter	等级 Grade	最小值 Minvalue	最大值 Maxvalue	平均值 Avevalue	标准 偏差 SD	变异 系数 CV/%
体积 V/cm ³	0	32.00	39.00	34.30	2.00	6
	1	25.00	32.00	29.25	2.05	7
	2	18.00	25.00	21.15	2.01	9
	3	12.00	18.00	15.00	1.78	12
	4	8.00	12.00	10.35	1.09	11
面积 S/cm ²	0	59.00	65.37	59.98	2.59	4
	1	47.78	56.37	52.45	2.80	5
	2	38.16	46.10	42.94	2.63	6
	3	29.70	37.90	33.66	2.88	9
	4	20.20	29.60	24.78	2.56	10

3.3 球体体积与表面积测量

球体的图像如图 7a 所示; 提取球体的边缘轮廓如图 7b 所示; 将边缘轮廓像素点坐标位置转换为三维点云, 如图 7c 所示; 将球体边缘轮廓的中心偏移 to 原点位置, 如图 7d

所示; 按映射关系转换为多轮廓模型, 如图 7e 所示; 将多轮廓模型进行下采样, 图 7f 所示; 对多轮廓模型进行垂直 Z 轴中心点进行投影, 如图 7g 所示; 提取投影面的边缘点, 如图 7h 所示。



a. 球体图像 b. 球体边缘轮廓 c. 图像像素坐标转换为三维点云 d. 三维点云的中心偏移 e. 按映射关系转换为多轮廓模型 f. 多轮廓模型下采样 g. 多轮廓模型 Z 轴中心点投影 h. 垂直投影面边界点
a. Small ball image b. Small ball edge contour c. Image pixel coordinates are converted to 3D point clouds d. Three-dimensional point cloud center offset e. Converted to multi-contour model by mapping relationship f. Multi-contour model downsampling g. Multi-contour model Z -axis center point projection h. Vertical projection surface boundary point

图 7 球体图像和点云处理过程

Fig.7 Process processing of spherical image and point cloud
球体样本的直径为 4.2, 3.4, 3.0, 2.8 和 2.4 cm, 按等间隔角度采集图像, 间隔角度设置为 15°、12°、9°、6° 和 4°, 对应采样图像帧数 12、15、20、30 和 45, 采集范围为 0°~180°。

3.4 球体投影面高度、间角和直径的误差分析

在表 2 中, 设球体直径为 3.4 cm 固定值, 轮廓间隔角度为 15°、12°、9°、6° 和 4° 和投影高度为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 和 0.5 cm。为分析投影高度和轮廓间角度对多轮廓球体模型体积和表面积的计算结果有影响。根据表 2, 找出多轮廓模型实际值和测量值之间相对误差的最大值和最小值, 来设定合适的投影高度和轮廓间角度, 当轮廓间角度为 4°, 投影高度为 0.1 cm 时, 体积的最小的相对误差为 6.0%; 当轮廓间角为 15° 时, 表面积最小相对误差为 1.0%。在本试验中, 多轮廓球体模型的体积随轮廓间角和投影高度的相对误差的增大而增大, 表面积的相对误差随轮廓间角和投影高度的增大而减小; 随球体模型轮廓间角的增大, 耗时和内存随之减少, 间隔角度 4°、6°、9°、12° 和 15° 相对应的消耗时间为 180, 120, 100, 60 和 30 s。

表 2 不同投影高度和间隔角度对球体模型的测量误差

Table 2 Measurement error of spherical model with different projection height and contour angle

经验公式 Empirical formula (EF)	间隔度角 Interval angle / (°)	球体直径 Sphere diameter /cm	投影高度 Projection height /cm	真实值 Actual value	测量值 Measured value	相对误差 Relative error/%
$V=\frac{4}{3}\pi R^3$	4	3.4	0.1	20.57	21.79	6.0
	6	3.4	0.2	20.57	22.13	8.0
	9	3.4	0.3	20.57	27.56	34.0
	12	3.4	0.4	20.57	27.64	34.0
	15	3.4	0.5	20.57	28.07	36.0
$S=4\pi R^2$	4	3.4	0.1	36.30	26.07	28.0
	6	3.4	0.2	36.30	27.06	25.0
	9	3.4	0.3	36.30	35.28	3.0
	12	3.4	0.4	36.30	35.34	3.0
	15	3.4	0.5	36.30	35.82	1.0

为分析不同直径对球体模型体积和表面积的计算结果的影响,在表3中,轮廓间角和投影高度为固定值,分别为9°和0.1、0.4 cm,直径为4.2、3.4、3.0、2.8和2.4 cm。观察表3,多轮廓体积模型体积和表面积相对误差随直径增大变化不明显,但球体直径越小,误差越大;计算多轮廓球体模型体积和表面积实际值和测量值之间相对误差的均值,分别为9.1%和4.34%。

3.5 不同等级红枣的误差分析

通过对多轮廓球体模型的分析,分别确定红枣模

型的投影高度分别为0.1 cm和0.5 cm,轮廓间角为9°,每个等级红枣数量为20个。计算不同等级红枣模型的体积和表面积。通过观察表4,多轮廓红枣模型体积和表面积的均方根误差随着等级变化不明显;体积平均相对误差随等级增大而增大,表面积的平均相对误差随着等级变化不明显;不同等级红枣体积模型的均方根误差和平均相对误差的均值分别为2.45 cm³和10.02%;表面积均方根误差和平均相对误差的均值为3.65 cm²和7.09%。

表3 不同直径球体的测量误差
Table 3 Measurement errors of spheres with different diameter

经验公式 Empirical formula	间隔角度 Interval angle/(°)	球体直径 Sphere diameter/cm	投影高度 Projection height/cm	真实值 Actual value	测量值 Measured value	相对误差 Relative error/%
$V=\frac{4}{3}\pi R^3$	9	2.4	0.1	7.23	7.95	9.9
	9	2.8	0.1	11.48	13.51	17.0
	9	3.0	0.1	14.13	15.30	8.2
	9	3.4	0.1	20.57	21.79	5.9
	9	4.2	0.1	44.50	46.52	4.5
$S=4\pi R^2$	9	2.4	0.4	18.08	15.63	13.5
	9	2.8	0.4	24.61	24.32	1.1
	9	3.0	0.4	28.26	29.15	3.1
	9	3.4	0.4	36.30	35.34	2.6
	9	4.2	0.4	60.79	59.90	1.4

表4 不同等级红枣体积和表面积的测量误差
Table 4 Measurement error of volume and surface area of different grades of red jujube

特征参数 Characteristic parameter	投影高度 Projection height /cm	等级 Grade	间隔角 度 Interval angle /(°)	均方根误差 Root mean square error RMSE	平均相 对误差 Mean relative error MRE/%
V/cm^3	0.1	0	9	2.57	3.60
	0.1	1	9	2.81	8.20
	0.1	2	9	2.99	11.30
	0.1	3	9	2.06	12.00
	0.1	4	9	1.83	17.00
S/cm^2	0.5	0	9	2.44	6.49
	0.5	1	9	3.38	7.83
	0.5	2	9	3.15	5.96
	0.5	3	9	4.73	7.47
	0.5	4	9	4.55	7.71

4 结 论

本文搭建图像采集的简易装置,按不同角度采集红枣的图像,编写图像处理软件,提取红枣二维图像轮廓构建多轮廓三维模型,分析在不同轮廓角度,不同投影高度和不同直径下球体和红枣三维模型的体积和表面积。

1)当球体直径为3.4 cm时,球体的轮廓间角和轮廓投影高度分别为15°,12°,9°,6°,4°和0.1,0.2,0.3,0.4,0.5 cm时,球体体积的测量值随轮廓间角和投影高度增大增大,而表面积的测量值轮廓间角和投影高度增大减小,体积和表面积的最大相对误差分别为6.0%和1.0%。

2)当球体轮廓间角为9°,球体体积和表面积的投影高度为0.1 cm和0.4 cm,直径为4.2,3.4,3.0,2.8,2.4 cm时,不同球体的体积和表面积随直径变化不明显,但直径越小,体积和表面积的误差越大,体积和表面积的相对误

差的均值为9.1%和4.34%。
3)当红枣轮廓间角为9°,体积和表面积的投影高度为0.1 cm和0.5 cm时,红枣的体积测量平均相对误差随等级的增大而增大,表面积随等级变化不明显,体积的均方根误差和平均相对误差的均值为2.45 cm³和10.2%;表面积的平均相对误差和平均相对误差的均值为3.65 cm²和7.09%。

本文采用多轮廓模型测量红枣的体积和表面积,判断红枣过程有一定偏差,需要改进算法来提高测量的精度。上述结论对测量红枣的体积的表面积的测量提供一种无损的测量方法,为红枣三维特征的分级装备开发提供技术参考。

[参 考 文 献]

[1] 胡芸莎,白宝伟,王伟. 新疆红枣产业发展现状与对策建议[J]. 新疆农机化,2016(6): 21—24.
Hu Yunsha, Bai Baowei, Wang Wei. Present development situation of red jujube industry in Xinjiang and relaive countermeasures and suggestion[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2016(6): 21—24.(in Chinese with English abstract)

[2] 沈从举,贾首星,郑炫,等. 红枣分级机械的现状与发展[J]. 中国农机化学报,2013,34(1): 26—30.
Shen Congju, Jia Shouxing, Zheng Xuan, et al. Actuality and development of jujube grader[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 34(1): 26—30. (in Chinese with English abstract)

[3] 颜秉忠,王晓玲. 基于计算机视觉技术大枣品质检测分级的研究[J]. 农机化研究,2018,40(8): 232—235, 268.
Yan Binzhong, Wang Xiaoling. Research on quality classification of jujube based on computer vision technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(8): 232—235, 268.(in Chinese with English abstract)

[4] 姚娜,吴刚,陈杰. 基于图像边缘检测的红枣大小分级[J]. 湖北

- 农业科学, 2014, 53(10): 2427-2430.
- Yao Na, Wu Gang, Chen Jie. Grading red dates based on the size from image edge detection[J]. Hubei Agricultural, 2014, 53(10): 2427—2430.
- [5] 张灵通, 李寿宁, 孙三民. 基于纹理南疆红枣外观品质应用研究[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(6): 1089—1093.
- Zhang Lingtong, Li Shouning, Sun Sanmin. Study on appearance quality classification based on detection of the stripes of red jujube in Southern Xinjiang[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2016, 28(6): 1089—1093. (in Chinese with English abstract)
- [6] 许敏, 马钺, 陈帅. 基于计算机视觉的红枣形状识别方法研究[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(4): 23—26.
- Xu Min, Ma Yue, Chen Shuai. Research on red based dates shape recognition method on computer vision[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(4): 23—26. (in Chinese with English abstract)
- [7] 詹映, 罗华平, 彭云发, 等. BP 神经网络南疆红枣颜色分级方法的研究[J]. 食品工业, 2015, 36(1): 165—167.
- Zhan Ying, Luo Huaping, Peng Yunfa, et al. Research of the BP artificial network in southern jujube color classification method[J]. The Food Industry, 2015, 36(1): 165—167. (in Chinese with English abstract)
- [8] 海潮, 赵凤霞, 孙烁. 基于 Blob 分析的红枣表面缺陷在线检测技术[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 126—129.
- Hai Chao, Zhao Fengxia, Sun Shuo. Research on online detection for jujube surface defects based on blob analysis[J]. Food & Machinery, 2018, 34(1): 126—129. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘仰龙, 王从庆, 高珏, 等. 基于小波描述子的水果果形分类[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2010, 36(3): 322—328.
- Liu Yanglong, Wang Congqing, Gao Yu, et al. Fruit shape classification based on wavelet descriptor[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences), 2010, 36(3): 322—328. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李景彬, 邓向武, 坎杂, 等. 基于机器视觉的干制红枣大小分级方法研究[J]. 农机化研究, 2014, 36(2): 55—59.
- Li Jingbin, Deng Xiangwu, Kan Za, et al. The method of automatic dried red jujube hierarchy based on machine vision[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(2): 55—59. (in Chinese with English abstract)
- [11] 肖爱玲, 潘斌. 基于标记的极半径极值红枣形状识别方法[J]. 农机化研究, 2015, 37(7): 61—65.
- Xiao Ailing, Pan Bin. Identification of the shape of Chinese date based on labelling method and extremum of polar radius[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(7): 61—65. (in Chinese with English abstract)
- [12] 黄应任, 李芳繁. 使用影像分级进行枣子分级之研究[J]. 农业机械学报, 1997, 6(2): 15—23.
- Huang Yinren, Li Fangfan. Jujubes grading using image processing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1997, 6(2): 15—23. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张雪松, 神会存. 基于单片机的光电式红枣分选技术研究[J]. 中原工学院学报, 2007, 18(2): 39—44.
- Zhang Xuesong, Shen Huicun. Optical separating technology of jujube based on MCU[J]. Journal of Zhongyuan University of Technology, 2007, 18(2): 39—44. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李龙, 彭彦昆, 李永玉. 苹果内外品质在线无损检测分级系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 267—275.
- Li long, Peng Yankun, Li Yongyu. Design and experiment on grading system for online non-destructive detection of internal and external quality of apple[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of CSAE), 2018, 34(9): 267—275.
- [15] 杨意, 初麒, 杨艳丽, 等. 基于机器视觉的白掌组培苗在线分级方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 33—40.
- Yang Yi, Chuqi, Yang Yanli, et al. Online grading method for tissue culture seedlings of *Spathiphyllum floribundum* based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, (Transactions of CSAE). 2016, 32(8): 33-40. (in Chinese with English abstract)
- [16] 杨耀民. 基于多轮廓图的马铃薯三维表面重建方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- Yang Yaomin. Study of 3-D Reconstruction Method of Potato using Contours[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王琳, 孙传恒, 李文勇, 等. 基于深度图像和BP神经网络的肉鸡体质量估测模型[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 199—205.
- Wang lin, Sun Chuanheng, Liu Wenyong, et al. Establishment of broiler quality estimation model based on depth image and BP neural[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of CSAE) 2017, 33(13): 199—205. (in Chinese with English abstract)
- [18] Frechette R J, Zahradnik J W. Surface area-weight relationships for mcintosh apples[J]. Transactions of the ASAE, 1966, 9(4): 526—527.
- [19] Clayton M, Amos N D, Banks N H, et al. Estimation of apple fruit surface area[J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 1995, 23(3), 345—349.
- [20] Uyar R, Erdoğan F. Potential use of 3-dimensional scanners for food process modeling[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93(3): 373—343.
- [21] 熊妮娜, 王佳, 罗旭, 等. 一种基于三维激光扫描系统测量树冠积方法的研究—以油松为例[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(增刊2): 61—65.
- Xiong Nina, Wang Jia, Luo Xu, et al. Measuring tree crown volume based on three dimension laser scanning and mapping system-taking pinus tabulaeformis as a case[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(Supp. 2): 61—65. (in Chinese with English abstract)
- [22] 龚爱平, 张卫正, 何勇, 等. 基于三维线框模型的类球体农产品体积和表面积测量[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 338—344.
- Gong Aipin, Zhang Weizheng, He Yong, et al. Measurement of volume and surface area for spheroid agricultural product based on 3D wire frame model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 338—344. (in Chinese with English abstract)
- [23] Gaonkar B, Macyszyn I, Bilello M, et al. Automated tumor volumetry using computer-aided image segmentation[J]. Academic Radiology, 2015, 22(5): 653—661.
- [24] 陈坤杰, 李航, 于镇伟, 等. 基于机器视觉的鸡胴体质量分级方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 290—295, 372.
- Chen Kunjie, Li Hang, Yu Zhengwei, et al. Grading of chicken carcass weight based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 290—295, 372. (in Chinese with English abstract)
- [25] 孙宝, 杨世恩. 结合量子技术和FCM的猪肉颜色分级研究[J]. 西南科技大学学报, 2018, 33(4): 83—89.
- Sun Bao, Yang Shien, Study of pork color grading based on quan-

- tum technology and FCM[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2018, 33(4):83—89.
- [26] 彭红星, 邹湘军, 陈丽娟, 等. 基于双次 Otsu 算法的野外荔枝多类色彩目标快速识别[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 61-68, 75. Peng Hongxing, Zou Xiangjun, Chen Lijuan, et al. Fast recognition of multiple color targets of litchi image in field environment based on double otsu algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 61-68, 75. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张鑫, 习俊通. 双目立体测量系统标定及精度评价[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(7): 160—163. Zhang Xin, Xi Juntong. Calibration and accuracy evaluation of binocular stereo measurement system[J]. Computer Application and Software, 2017, 31(7): 160—163. (in Chinese with English abstract).
- [28] 魏东, 李冬梅, 黄有群. 三维图形绕坐标轴连续旋转的算法与实现[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 29(6): 696—698. Wei Dong, Li Dongmei, Huang Youqun. Algorithm and implementation of continuous rotation of three-dimensional graphic around coordinate axis[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2007, 29(6): 696—698.
- [29] 梁周雁, 邵为真, 孙文潇, 等. 基于 PCL 的点云数据空间管理及近邻搜索[J]. 北京测绘, 2018, 32(1): 52—57. Liang Zhouyan, ShaoWeizhen, Sun Wenxiao et al. Space management of point cloud and searching nearest neighbors based on point cloud library[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2018, 32(1): 52—57. (in Chinese with English abstract)
- [30] Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330—1334.
- [31] 宋彦, 谢汉垒, 宁井铭, 等. 基于机器视觉形状特征参数的祁门红茶等级识别[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 279—286. Song Yan, Xie Hanlei, Ning Jingming, et al. Grading Keemun black tea based on shape feature parameters of machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(23): 279—286. (in Chinese with English abstract)
- [32] 段振云, 王宁, 赵文辉, 等. 基于点阵标定板的视觉测量系统的标定方法[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 151—159. Duan Zhenyun, Wang Ning, Zhao Wenhui, et al. Calibration method based on lattice calibration plate in vision measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 151—159. (in Chinese with English abstract)

On-line measurement method for volume and surface area of red jujube based on multi-contour model

Wu Mingqing^{1,2}, Yi Xiaokang², Luo Huapin², Li Chuanfeng², Tang Xiaoyan³, Chen Kunjie^{1*}

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031 China;

2. College of Mechanic and Electrical Engineering, Tarim University, Alar 843300, China;

3. Green Food Office of Agricultural and Rural Affairs Department of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China)

Abstract: Ample sunshine, together with scarce rainfall and large variation in diurnal temperature, makes Xinjiang a unique place for producing tasty red jujube in China. Grading is an important parameter for storing and processing the jujube to maximize its market value, and needs to measure its volume and surface area. Traditional methods for measuring fruit volume are spheroid-like to measure the volume of water the fruit displaces when being immersed into water, with the surface area measured by peeling or slicing. These methods are inefficient and cannot be used for real-time measurement. The aim of this paper is to present a real-time multi-contour model to estimate the volume and surface area of the red jujube. We assessed the effect of contour angles, projection heights and diameters on the ultimate results. In the proposed method, 2D images of the targeted jujube were captured on a rotating circular table using a camera, and the contour of the images was then extracted using image processing. A 3D multi-contour model was developed based on the extracted 2D contour, and it was then used to estimate the volume and surface area of the targeted jujube. The result showed that the diameter of the target estimated by the multi-contour sphere model did not change, and that with an increase in the relative errors between the contours angle and the projection height, the volume estimated by the model increased (with the minimum relative error being 6.0%) while the error of the estimated surface area decreased (with the minimum being 1.0%). The angle between the contour and the projection height in the multi-contour sphere model had a prescribed value, and the relative error of the volume and surface area estimated by the model varied with the diameter in that the smaller the diameter was, the bigger the errors were. The average mean square error and the average relative error of the volume and surface area estimated by the model were 2.45 cm³ and 10.2%, and 3.65 cm² and 7.09%, respectively. An increase in grading appeared to increase the average relative errors of the estimated volume but had no noticeable impact on other factors. In summary, the multi-contour model for real-time measuring the volume and surface area of the red jujube offers an alternative to grading the jujube although further improvement is needed to reduce the errors.

Keywords: computer vision; models; classification; red jujube; multi contour model; volume; surface area