

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.07.041

# 基于比重和图像的核桃内部品质无损检测与分选

于大国<sup>1</sup> 赵明<sup>1</sup> SHI Yijun<sup>2</sup> 陈俐华<sup>1</sup> 曹成茂<sup>3</sup> 王俊元<sup>1</sup>

(1. 中北大学机械工程学院, 太原 030051; 2. 吕勒奥理工大学机械零件部, 吕勒奥 971 87;

3. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036)

**摘要:** 针对核桃内部品质不易检测、市场上带壳核桃中劣质核桃比例较高的问题, 阐述了根据比重判断核桃内部品质的原理, 提出核桃无损检测与分选方案。将摄像工具所采集的核桃图像进行处理、拟合, 并估算核桃体积; 由称量平台获取核桃质量并换算成重量; 根据核桃的比重使不同核桃落入不同容器中, 或根据核桃冲击力与核桃体积的比值, 即比重等效参数对核桃进行检测与分选。在核桃下落到平面时, 核桃中分面与平面的夹角相对稳定在 60° 左右, 利用这一特点设置正面、侧面图像采集工具, 可较准确地获取核桃的轮廓, 从而提高分选精度。该方法可间接检测核桃内部品质, 对核桃壳仁、工作环境、操作人员均无不良影响。

**关键词:** 核桃; 检测; 分选; 比重

中图分类号: TP391.41; S664.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)07-0373-06

OSID:



## Internal Quality Nondestructive Detection and Sorting Principle of Walnut Based on Density and Digital Image

YU Daguo<sup>1</sup> ZHAO Ming<sup>1</sup> SHI Yijun<sup>2</sup> CHEN Lihua<sup>1</sup> CAO Chengmao<sup>3</sup> WANG Junyuan<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China

2. Division of Machine Elements, Luleå University of Technology, Luleå 971 87, Sweden

3. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract:** Because the internal quality of walnuts is not easy to detect and a certain proportion of shelled walnuts in supermarkets are of poor quality, the principle of judging the internal quality of walnut according to the density was discussed, and the method and equipment of walnut sorting were studied. The principle of sorting walnuts was as follows: firstly, the walnut image collected by the camera was processed to estimate the volume of walnut; the weight of walnut was obtained; the gas pipe was selected according to the density of walnut to output gas; as a result, different walnuts fell into different containers. Walnut can also be detected and sorted according to density equivalent parameters. Secondly, when the walnut fell to the platform, the angle between its split plane and the platform was always about 60°. With this feature, the front and side cameras can be set in the correct orientation to obtain the contours of walnut, calculate the density of walnut and improve the sorting accuracy. In conclusion, this technology can indirectly detect the internal quality of walnut and promote intelligent and advanced detection. The sorting scheme had no adverse effect on walnut, working environment and operators. With the decrease of camera price, the decline of image processing cost and the improvement of computer operation speed, the cost of walnut sorter would be greatly reduced. The food processing plant would be able to arrange multiple work stations and multiple sorters at the same time, so as to meet the requirements of production efficiency when large quantities of walnut were sorted. Compared with the existing methods, the proposed method can realize nondestructive detection and had high academic value.

**Key words:** walnut; detection; sorting; density

收稿日期: 2021-01-28 修回日期: 2021-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075003, 61379080)和山西省回国留学人员科研基金项目(HGKY2019065)

作者简介: 于大国(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械设计和机械制造深孔加工研究, E-mail: yudaguol2@qq.com

## 0 引言

核桃内部品质不易检测,市场上的带壳核桃常存在不饱满、有病虫害、霉烂等不合格产品,空瘪现象较为严重<sup>[1]</sup>。

目前,核桃筛选的方法主要有网式、筒式、辊轴式等<sup>[2-4]</sup>,这类方法根据核桃体积对核桃进行分类,不能识别核桃的内部品质。文献[5-6]申请了利用超声和CT技术检测核桃内部品质的专利,但后续研究未见报道。近年来,研究人员尝试利用数字图像技术来识别核桃的大小。文献[7]以核桃投影面积为自变量,以核桃质量为因变量,建立了一元二次多项式回归质量预测模型,以模型预测核桃质量。文献[8]利用影像检测仪对核桃的色泽及直径进行检测,以直径和色泽为参数分选核桃。文献[9-10]提出将图像技术应用于核桃分选检测研究。上述研究均不够成熟,且不能根据比重检测核桃内部品质。

在国外的相关报道中,文献[11]利用计算机视觉技术识别核桃的大小。文献[12]提出了破壳后的核桃仁的检测方法。文献[13]利用核桃仁与核桃壳纹理模式的不同来判断图像内容。文献[14]研究了光谱与核桃含水率之间的关系。文献[15-17]也研究了核桃壳颜色与含水率关系。在其他农产品检测与分类上,一些研究人员也应用计算机视觉技术进行了相关研究<sup>[18-22]</sup>。

目前,主要基于核桃大小进行分类,分选设备以网式、筒式、辊轴式为主,另有少量通过图像识别进行分类的理论研究,尚无能够检测核桃内部品质的实用设备。随着计算机运行速度的提高和图像设备成本的降低,利用图像识别工具、借鉴国内外相关技术探讨基于比重的核桃无损检测、分选方法及其设备具有研究价值。本文通过摄像工具采集核桃图像数据,并进行处理、拟合,估算核桃体积,由传感器获得核桃的质量,根据核桃的比重或比重等效参数对核桃进行检测和分选。

## 1 核桃无损检测与分选原理

### 1.1 基于比重的检测与分选方案

如图1所示,本方案主要包括料框、取料部分、送料部分、检测部分、控制部分(未示出)、分配部分。料框内有核桃,核桃有中分线;取料部分有取料带、取料轮,取料带上有凹坑,凹坑的形状与核桃轮廓相似,便于将料框内的核桃带出;送料部分有带槽导向条,导向条内部光滑,其凹槽与核桃轮廓具有一致性,核桃在取料轮处落入带槽导向条;检测部分包括正面图像采集器、侧面图像采集器、称量平台。两

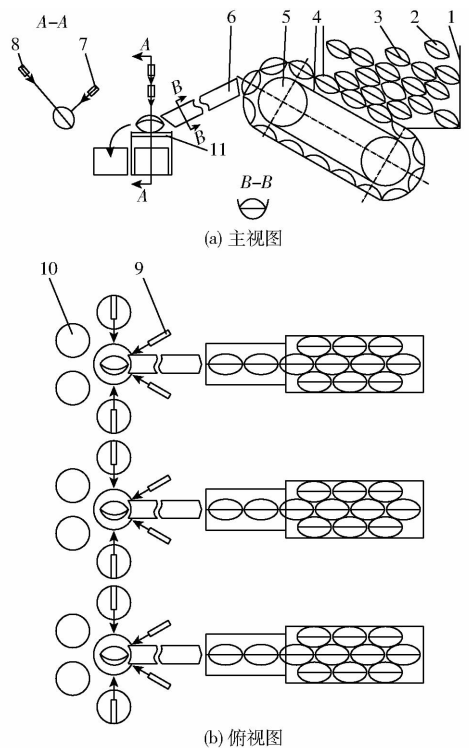


图1 基于比重的无损检测与分选

Fig. 1 Detection and sorting based on density

1. 料框 2. 核桃 3. 中分线 4. 取料带 5. 取料轮 6. 带槽导向条 7. 正面图像采集器 8. 侧面图像采集器 9. 气嘴 10. 分类箱 11. 称量平台

个图像采集器分别从垂直于核桃中分面和沿着中分面的两个方向拍摄核桃。核桃经带槽导向条后落入称量平台;称量平台通过数据线与计算机相连。分配部分包括两个以上气嘴、两个以上分类箱,气嘴将核桃吹入其对面的分类箱内。由图像得到核桃的轮廓和体积 $V$ 等几何参数,由称量平台获得核桃的质量(由平台自动换算成重量 $G$ 或冲击力)。由 $G$ 与 $V$ 两个参数的比值得到核桃的比重,根据比重选择气嘴,使不同核桃落入不同分类箱。此时也可同时结合核桃体积等参数进行分选。

本方案的优势在于:求核桃比重 $\gamma$ ,有助于判别核桃内部品质,实现了无损检测;相较于一个图像采集器,两个图像采集器所获得的信息更为全面;图像采集器分别从垂直和沿着核桃中分面的两个方向拍摄核桃,相较于任意两个方向拍摄,对于检测核桃轮廓识别精度更高;核桃落到称量平台时,必有一侧中分线与平台上表面接触,核桃中分面与称量平台上表面的夹角稳定于 $60^\circ$ 左右,有利于正确设置图像采集工具。

### 1.2 基于比重等效参数的检测与分选方案

图2为基于比重等效参数 $F/V$ 的无损检测方案。

如图2所示,核桃位于料框内,取料带将其从下

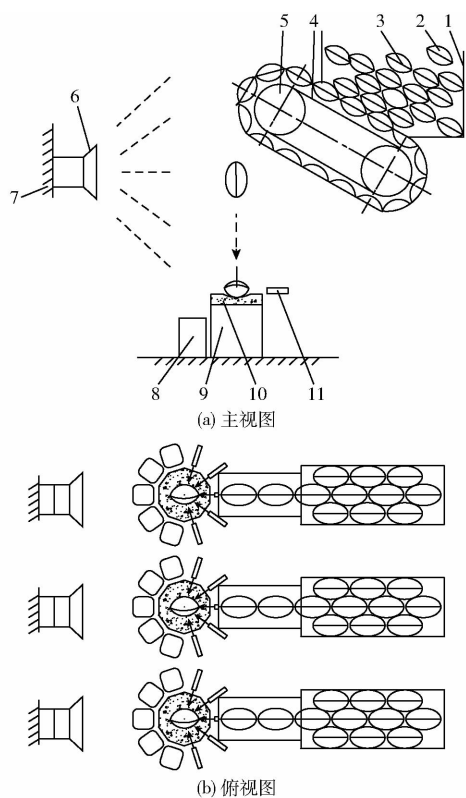


图 2 基于比重等效参数  $F/V$  的无损检测与分选

Fig. 2 Detection and sorting based on  $F/V$

1. 料框 2. 核桃 3. 中分线 4. 取料带 5. 取料轮 6. 摄像机
7. 摄像机座 8. 料桶 9. 力传感器 10. 带窝水平垫 11. 水平气嘴

向上输送。然后,核桃作自由落体运动。在核桃向下运动、轨迹变得稳定时,摄像机拍照,获得核桃图像。当核桃落在带窝水平垫的窝坑内时,力传感器测量出核桃向下的冲击力  $F$ 。

控制系统根据核桃图像进行拟合,求出核桃体积  $V$ 。定义  $F/V$  为比重等效参数,系统根据此值向水平气嘴发出指令,使核桃分别落入不同的料桶。

## 2 检测与分选

### 2.1 核桃图像平滑处理与边缘分析

核桃图像经过平滑处理,每一个像素点的值,都由其本身值和邻域内的其他像素值经过加权平均后得到,同时离中心越近的像素权重越高。因此,图像的平滑效果柔和,边缘保留良好。设  $(x, y)$  为点的坐标,  $H(x, y)$  为高斯函数,  $f(x, y)$  为图像函数,  $G(x, y)$  为处理后的图像函数,计算式为<sup>[23-24]</sup>

$$H(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

$$G(x, y) = f(x, y)H(x, y) \quad (2)$$

式中  $\sigma$ ——方差

如果图像的函数连续,通过求函数  $x, y$  方向上的偏导数  $G_x, G_y$ , 有助于搜索图像的边缘。图像函

数  $G$  满足

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (3)$$

$G$  取最大值时对应的点有可能在边缘上。梯度方向角计算公式为

$$\beta = \arctan \frac{G_y}{G_x} \quad (4)$$

以上是计算原理,实际图像是离散的,以差分代替求导。可用 Canny 算子或其他算子实现以上边缘搜索。

### 2.2 核桃轮廓拟合

图 3a 所对应的核桃,其图像的轮廓可拟合为椭圆。图 3b 所对应的核桃,其图像的轮廓可拟合为圆;或者拟合为图 3c 所示的阿基米德螺线,设  $r$  为极径,  $\theta$  为极角,则相应极坐标方程为:  $r = k\theta$ ; 还可将图 3b 图像的轮廓拟合为图 3d 所示的心形线,相应坐标方程为

$$r = a'(1 - \cos\theta) \quad (5)$$

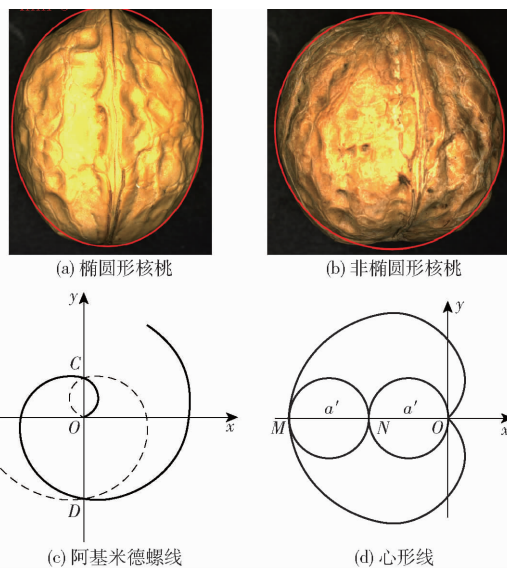


图 3 核桃图像与螺线和心形线

Fig. 3 Walnut photos with helix and cardioid

将核桃图像拟合为椭圆的过程如下:椭圆平移  $m, n$ , 并旋转  $\alpha$  后的方程为

$$\frac{[(x - m) \cos\alpha + (y - n) \sin\alpha]^2}{a^2} + \frac{[(y - n) \cos\alpha - (x - m) \sin\alpha]^2}{b^2} = 1 \quad (6)$$

由式(6)可得到椭圆的一般方程为

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (7)$$

为了得到方程中的各系数,对边缘检测过程中的离散点进行最小二乘处理。由于椭圆上的各点符合条件  $Ax_i^2 + Bx_i y_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + F = 0$ , 因此可通过求目标函数

$$f(A, B, C, D, E, F) =$$

$$\sum_{i=1}^N (Ax_i^2 + Bx_i y_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + F)^2 \quad (8)$$

式中  $N$ ——离散点的数量

的最小值来确定各系数。由极值原理,欲使 $f(A, B, C, D, E, F)$ 值为最小,必有 $\frac{\partial f}{\partial A} = 0, \frac{\partial f}{\partial B} = 0, \frac{\partial f}{\partial C} = 0,$

$$\frac{\partial f}{\partial D} = 0, \frac{\partial f}{\partial E} = 0, \frac{\partial f}{\partial F} = 0。$$

由此可得一个线性方程组,然后解线性方程组,就可以求得系数 $A, B, C, D, E, F$ 的值。进而可以求出椭圆的长轴 $2a$ 、短轴 $2b$ 、面积 $\pi ab$ 。但是,现有数学手册或国内外椭圆研究文献一般只讨论了椭圆长轴、短轴平行于坐标轴时的长轴 $2a$ 、短轴 $2b$ 和面积 $\pi ab$ <sup>[23-25]</sup>,而对于椭圆长轴、短轴不平行于坐标轴,且椭圆中心不在坐标系原点的一般情况,讨论很少。图像处理文献中一般也未提供计算椭圆长轴、短轴参数的公式<sup>[26-27]</sup>,因此,本文给出相关公式如下:

椭圆几何中心为

$$\begin{cases} X_c = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2} \\ Y_c = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2} \end{cases} \quad (9)$$

椭圆长轴长度 $2a$ 、短轴长度 $2b$ 满足公式

$$\begin{cases} a^2 = \frac{2(AX_c^2 + BX_c Y_c + CY_c^2 - F)}{A + C - \sqrt{(A - C)^2 + B^2}} \\ b^2 = \frac{2(AX_c^2 + BX_c Y_c + CY_c^2 - F)}{A + C + \sqrt{(A - C)^2 + B^2}} \end{cases} \quad (10)$$

当 $A \neq C$ 时,椭圆长轴与坐标系 $x$ 轴的夹角 $\theta'$ 满足

$$\tan \theta' = -\frac{A - C + \sqrt{(A - C)^2 + B^2}}{B} \quad (11)$$

当 $A = C$ 时,椭圆长轴与坐标系 $x$ 轴的夹角 $\theta'$ 为

$$\theta' = \begin{cases} \frac{\pi}{2} & (B > 0) \\ -\frac{\pi}{2} & (B < 0) \end{cases} \quad (12)$$

当 $A = C, B = 0$ 时,椭圆退化为圆。

通过上述方法,得到了所拟合椭圆的参数,为估算核桃体积奠定了基础。当将核桃图像的轮廓拟合为阿基米德螺线 $r = k\theta$ ,或心形线 $r = a'(1 - \cos\theta)$ 时,同理可以求得两个极坐标方程中的参数 $k$ 和 $a'$ ,作为计算核桃体积的依据。

### 2.3 根据拟合的轮廓求取核桃体积

将核桃拟合为球体时,核桃体积的计算公式为: $V = 4\pi R^3/3, R$ 表示球体半径。将核桃的轮廓拟合

为椭圆时,核桃体积为

$$V = \frac{4}{3}\pi abc \quad (13)$$

式中  $c$ ——椭圆体长第三轴半径

将核桃轮廓拟合为 $r = a'(1 - \cos\theta)$ 的心形线时(图3),核桃的体积为

$$V = \iiint_V F'(r, \phi, \theta) r^2 \sin\phi d\phi d\theta dr = \frac{8\pi}{3} a'^3 \quad (14)$$

式中  $\phi$ ——矢径与 $z$ 轴正向夹角

$F'$ ——球面坐标系

将核桃轮廓拟合为 $r = k\theta$ 的阿基米德螺线时(图3),核桃的体积为

$$V = \iiint_V d\theta d\phi dr = \frac{15}{6} k^3 \pi^4 = \frac{5}{2} k^3 \pi^4 \quad (15)$$

### 2.4 核桃分级

以下给出按比重对核桃进行分级的公式。设 $n_1, n_2, \dots, n_k$ 为临界值,是依据行业标准或本批核桃的统计结果或人群需求确定的数值。一等品对应于: $n_1 \leq r$ ;二等品对应于: $n_2 \leq r < n_1$ 。其余等级以此类推。不能食用,需要淘汰的核桃对应于: $r < n_k$ 。依据不同的 $r$ 值,设备自动使不同的核桃落入不同的分类箱内。还可发出一级、二级、...、淘汰的语音,提示对核桃的分级。

同理,也可按照比重等效参数 $F/V$ 对核桃进行分类。

## 3 实验

### 3.1 核桃着落实验

依上文所述,核桃落到图1中的称量平台时,必有一侧中分线与平台上表面接触,核桃中分面与称量平台上表面的夹角相对稳定于 $60^\circ$ 左右。图4为验证这一结论的实验图像。图4a~4d按时间先后顺序排列,图4d显示核桃中分面的倾角。核桃着落后具有稳定的倾角,为正确设置图像采集工具的方位提供了依据。当两个摄像工具分别垂直于核桃中分面和沿中分面拍照时,有利于准确获得核桃的轮廓和估算核桃体积,能提高分选精度。

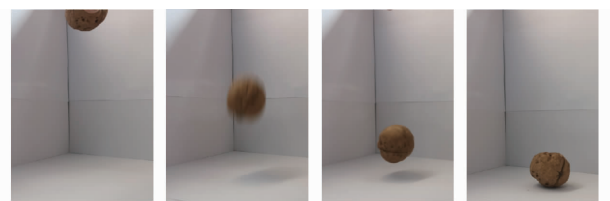


图4 核桃下落过程

Fig. 4 Walnut dropping process

### 3.2 图像处理流程

核桃图像处理流程如图5所示。

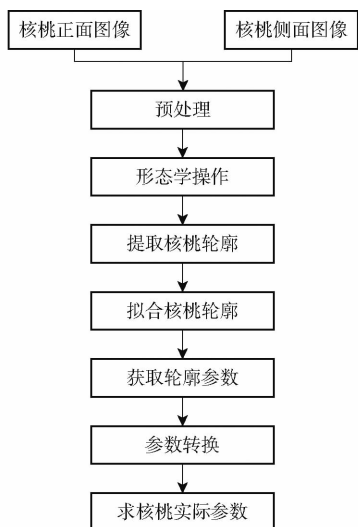


图 5 图像处理流程图

Fig. 5 Image processing steps

### 3.3 核桃图像处理及其参数

通过核桃图像求核桃体积,需要确定物理尺寸与像素间的换算关系。利用带有固定间距图案阵列的平板即标定板可完成标定。图 6a 为标定板,图 6b 为标定板 mark 亚像素轮廓,每行圆心距有 6 个,共 7 行,因此共有 42 个圆心距。同理,每列圆心距有 6 个,共 7 列,因此共有 42 个圆心距。行、列合计有 84 个圆心距。图 6c 以像素表示圆心距(间距),84 个间距实际距离在 98.90 ~ 99.25 像素范围内,不完全一致,将间距细分为 7 个尺寸段后,各尺寸段的个数由图 6c 纵坐标表示。因此,图 6c 是标定板圆心距(间距)的直方图。通过拍摄标定板,经过标定算法的计算,可以得出物理尺寸与像素间的换算关系,从而实现高精度测量。

图 7 是处理核桃图像以及将其轮廓拟合为椭圆的部分截图,显示主要过程及图像拟合结果。从

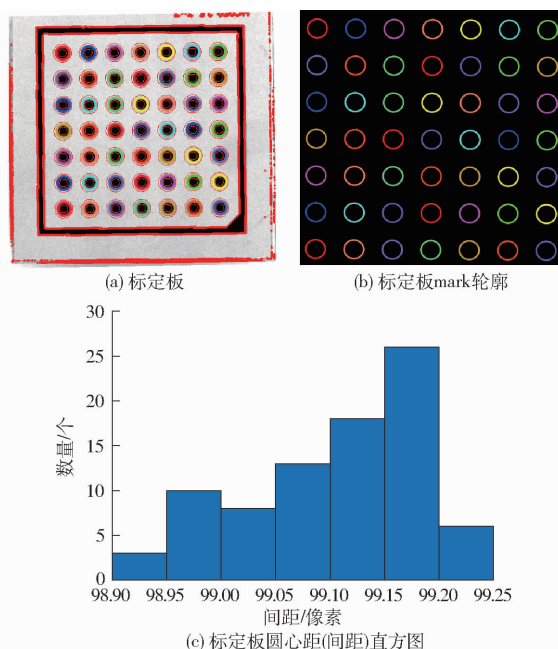


图 6 相机标定

Fig. 6 Camera calibration

图 7f 中可见:椭圆长轴半径 23.574 mm,椭圆短轴半径 16.246 mm,椭圆长轴倾角 5.1835°,椭圆面积 1 203.16 mm<sup>2</sup>。

分别根据核桃不同方位图像进行拟合,依据所获得的参数,可求出核桃椭球体的体积,图 8a 中,形状拟合为椭球体的核桃体积为 25 549.05 mm<sup>3</sup>。容易测量出核桃的重量或冲击力,因此可计算核桃的比重或比重等效参数。当将核桃图像轮廓拟合为其他曲线时,同理可得所拟合曲线的参数,进而求出核桃体积。图 8b 中核桃的体积为 28 852.59 mm<sup>3</sup>。在此基础上,可求出此核桃比重或比重等效参数,作为对核桃进行分类的依据。

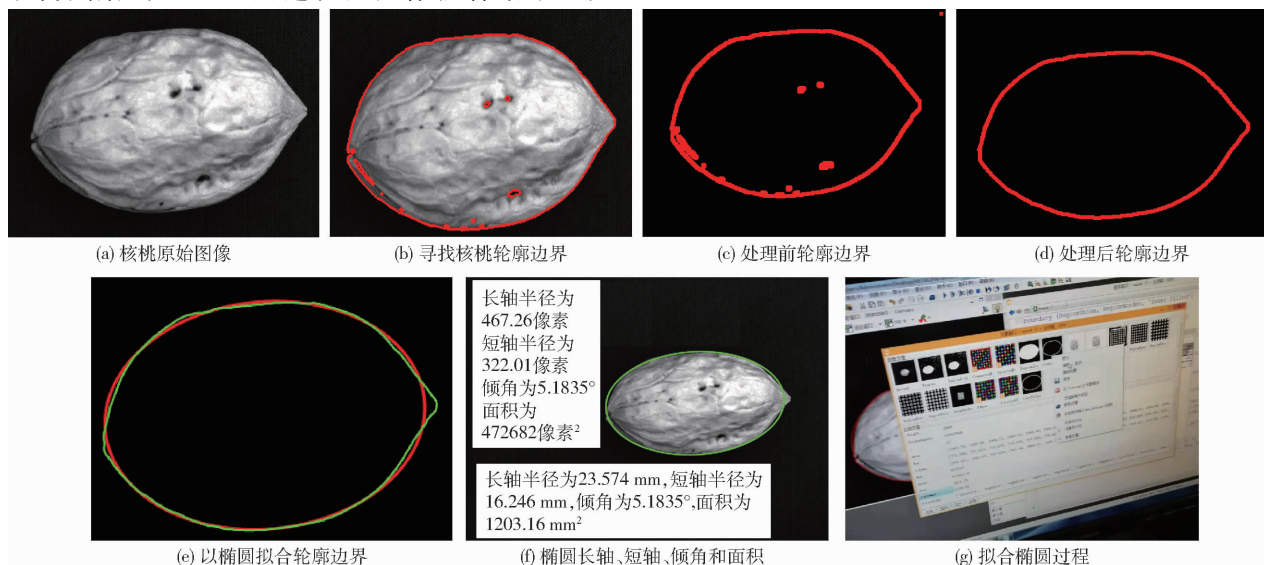


图 7 将核桃轮廓拟合为椭圆过程

Fig. 7 Walnut contour fitting

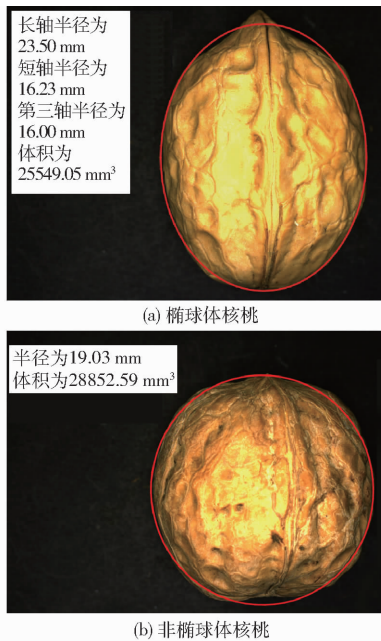


图8 核桃体积

Fig. 8 Walnut volume

## 4 结论

(1)研究了核桃无损检测与分选原理。将摄像工具所采集的核桃图像进行处理、拟合,并估算核桃体积 $V$ ,由传感器获取换算得到核桃的重量。根据核桃的比重使核桃落入不同容器中,或者按照比重等效参数对核桃进行检测和分选。

(2)现有图像处理技术能够识别核桃轮廓,进而可较准确地估算核桃的体积,现有传感器能够测量核桃重量或冲击力。实验中,在核桃下落到平面时,一侧中分线与平面接触,中分面与平面的夹角稳定在 $60^\circ$ 左右,利用这一特点分别设置正面、侧面图像采集工具,能较准确地获取核桃的轮廓,从而提高分选精度。

(3)所设计的方案可间接检测核桃的内部品质,检测方案对核桃壳仁、工作环境、操作人员均无不良影响。

## 参 考 文 献

- [1] 买合木江·巴吐尔,李忠新,杨莉玲,等. 6FX-1000型核桃风选机设计与试验[J]. 农业工程, 2016, 6(4):69-70. MAIHEMUJIANG Batur, LI Zhongxin, YANG Liling, et al. Design and experiment of 6FX-1000 type walnut winnowing machine[J]. Agricultural Engineering, 2016, 6(4):69-70. (in Chinese)
- [2] 王科权,肖爱玲,张宏,等. 核桃分选机的研究现状[J]. 农机化研究, 2015, 37(7):264-268. WANG Kequan, XIAO Ailing, ZHANG Hong, et al. Research status of walnut sorting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(7):264-268. (in Chinese)
- [3] 宋乐鹏,李旭超,陈勇康. 一种核桃自动分选系统及控制方法:201910909111.7[P]. 2019-12-30.
- [4] 周占霞,李波. 核桃分离和分级机构设计[J]. 时代农机, 2016, 43(6):43-44,47. ZHOU Zhanxia, LI Bo. Design of walnut separation and classification mechanism[J]. Times Agricultural Machinery, 2016, 43(6):43-44,47. (in Chinese)
- [5] 侯旭杰,李述刚,丁羽. 基于数字超声成像技术的核桃分选机:201220406290.6[P]. 2012-08-16.
- [6] 李述刚,于军,丁羽. 基于CT成像的核桃品质自动分选机:201220214707.9[P]. 2012-12-12.
- [7] 李成吉,张淑娟,孙海霞,等. 基于计算机视觉核桃质量预测方法的研究[J]. 农产品加工, 2019(5):10-13. LI Chengji, ZHANG Shujuan, SUN Haixia, et al. Research on weight prediction method of walnut based on computer vision [J]. Farm Products Processing, 2019(5):10-13. (in Chinese)
- [8] 蔡红亮. 核桃分选机及核桃分选方法:201410790956.6[P]. 2015-03-24.
- [9] 于大国. 一种分选机械:201910332471.5[P]. 2019-04-12.
- [10] 王俊元. 基于图像识别的桃核无损检测设备与方法:201811490876.3[P]. 2018-11-30.
- [11] TRAN T, NGUYEN T, NGUYEN M, et al. A computer vision based machine for walnuts sorting using robot operating system [C]//International Conference on Advances in Information and Communication Technology. Springer, Cham, 2016:9-18.
- [12] ZHAI Zhiqiang, JIN Zuohui, LI Jiangbo, et al. Machine learning for detection of walnuts with shriveled kernels by fusing weight and image information[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(12):e13562.
- [13] JIN Fenghua, QIN Lei, JIANG Lu, et al. Novel separation method of black walnut meat from shell using invariant features and a supervised self-organizing map[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 88(1):75-85.
- [14] WANG Xiaotuo, ATUNGULU G G, KHIR R, et al. Sorting in-shell walnuts using near infrared spectroscopy for improved drying efficiency and product quality[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2017, 26(1):165-172.
- [15] KHIR R, ATUNGULU G G, PAN Zhongli, et al. Moisture-dependent color characteristics of walnuts[J]. International Journal of Food Properties, 2014, 17(4):877-890.
- [16] KHIR R, PAN Zhongli, ATUNGULU G G, et al. Size and moisture distribution characteristics of walnuts and their components [J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(3):771-782.
- [17] KHIR R, PAN Zhongli, ATUNGULU G G, et al. Characterization of physical and aerodynamic properties of walnuts[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(1):53-61.

- [16] 张坤英. 维持性血液透析患者血浆维生素 C 水平研究进展[J]. 中国血液净化, 2012, 11(2):88-91.  
ZHANG Kunying. Research progress of plasma vitamin C level in maintenance hemodialysis patients[J]. Chinese Journal of Blood Purification, 2012, 11(2):88-91. (in Chinese)
- [17] PACIOLLA C, FORTUNATO S, DIPIERRO N, et al. Vitamin C in plants: from functions to biofortification [J]. Antioxidants, 2019, 8(11):519.
- [18] ZHANG T, ZHAO Z, FANG X, et al. Determining method, conditional factors, traits and applications of nonlinear chemical fingerprint by using dissipative components in samples[J]. Science China Chemistry, 2011, 55(2): 285-303.
- [19] GAO J, WEI X, YANG W, et al. Determination of 1-naphthylamine by using oscillating chemical reaction[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 144(1-2): 67-72.
- [20] 杨树涛, 甘南琴, 林智信, 等. 用化学振荡(乳酸-丙酮- $\text{BrO}_3^-$ - $\text{Mn}^{2+}$ - $\text{H}_2\text{SO}_4$ 体系)“探针”检测谷胱甘肽的抗氧化效应[J]. 高等化学学报, 2002, 23(6): 1026-1029.  
YANG Shutao, GAN Nanqin, LIN Zhixin, et al. Determination of activity of antioxygenation of glutathione by the “probe” of the lactic acid(LA)-acetone(Act)- $\text{BrO}_3^-$ - $\text{Mn}^{2+}$ - $\text{H}_2\text{SO}_4$  oscillating system[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2002, 23(6): 1026-1029. (in Chinese)
- [21] 安从俊, 甘南琴, 刘义, 等. 乙酰丙酮- $\text{BrO}_3^-$ - $\text{Mn}^{2+}$ - $\text{H}_2\text{SO}_4$ 的非线性化学反应新特征[J]. 武汉大学学报(自然科学版), 1999, 45(4): 411-414.  
AN Congjun, GAN Nanqin, LIU Yi, et al. New characteristics of nonlinear chemical reaction of acetylacetone- $\text{BrO}_3^-$ - $\text{Mn}^{2+}$ - $\text{H}_2\text{SO}_4$ [J]. Journal of Wuhan University(Natural Science Edition), 1999, 45(4): 411-414. (in Chinese)
- [22] 安从俊, 庄林, 刘义, 等. 乳酸-丙酮- $\text{BrO}_3^-$ - $\text{Mn}^{2+}$ - $\text{H}_2\text{SO}_4$ 化学振荡体系动力学研究[J]. 化学学报, 1997, 55(3): 259-264.  
AN Congjun, ZHUANG Lin, LIU Yi, et al. Kinetic study of lactic acid-acetone- $\text{BrO}_3^-$ - $\text{Mn}^{2+}$ - $\text{H}_2\text{SO}_4$  chemical oscillatory reaction[J]. Acta Chimica Sinica, 1997, 55(3): 259-264. (in Chinese)
- [23] 张珂, 蔡汝秀, 马万红, 等. 超痕量  $\text{H}_2\text{O}_2$  对  $\text{MnSO}_4$ - $\text{KBrO}_3$ -乙酰丙酮化学振荡体系的扰动[J]. 高等学校化学学报, 2000, 21(3): 377-379.  
ZHANG Ke, CAI Ruxiu, MA Wanhong, et al. Perturbation effect of ultra trace hydrogen peroxide on the  $\text{MnSO}_4$ - $\text{KBrO}_3$ -diacetone oscillating chemical reaction[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2000, 21(3): 377-379. (in Chinese)
- [24] 张业中, 安从俊, 丁宗洲, 等. 氟离子-乳酸-丙酮- $\text{Mn}^{2+}$ - $\text{BrO}_3^-$ - $\text{H}_2\text{SO}_4$ 振荡反应及其在分析中的应用[J]. 分析科学学报, 2004, 20(4):345-348.  
ZHANG Yezhong, AN Congjun, DING Zongzhou, et al. The chemical oscillation reaction of  $\text{F}^-$ -lactic acid-acetone- $\text{BrO}_3^-$ - $\text{Mn}^{2+}$ - $\text{H}_2\text{SO}_4$  and its application in analysis[J]. Journal of Analytical Science, 2004, 20(4):345-348. (in Chinese)
- [25] 谭雪莹, 张泰铭, 邓飞跃, 等. 非线性化学指纹图谱技术用于菖蒲的鉴别及二元混合物中不同菖蒲含量的测定[J]. 高等学校化学学报, 2018, 39(7): 1440-1448.  
TAN Xueying, ZHANG Taiming, DENG Feiyue, et al. Identification of different *Acorus calamus* and determination of content of *Acorus calamus* in binary mixtures by nonlinear chemical fingerprint[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2018, 39(7): 1440-1448. (in Chinese)

(上接第 378 页)

- [18] 何建国, 贺晓光, 王松磊. 基于机器视觉技术的红枣无损自动分级机:201320304523.6[P]. 2013-12-03.
- [19] 王定汉, 冯桂兰, 王雄. 一种苹果自动挑选系统:201711170523.0[P]. 2017-11-12.
- [20] 赵娟, 彭彦昆, SAGAR D, 等. 基于机器视觉的苹果外观缺陷在线检测[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1):260-263.  
ZHAO Juan, PENG Yankun, SAGAR D, et al. On-line detection of apple surface defect based on image processing method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1):260-263. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2013s146&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s146&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.046. (in Chinese)
- [21] 黄文化. 一种新型胡萝卜分选装置:201520462120.3[P]. 2015-10-27.
- [22] 邓继忠, 李山, 张建瓴, 等. 小型农产品分选机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9):245-250,313.  
DENG Jizhong, LI Shan, ZHANG Jianling, et al. Design and test of small-scale sorting machine for agricultural products[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):245-250,313. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150936&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150936&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.036. (in Chinese)
- [23] 王栋. 数学手册[M]. 北京:科学技术文献出版社, 2007.
- [24] 高本庆. 椭圆函数及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1991.
- [25] DALE H. Elliptic curves[M]. Second edition. Berlin:Springer, 2009.
- [26] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing[M]. Second edition. Upper Saddle River:Pearson Prentice Hall, 2002.
- [27] 阮秋琦. 数字图像处理基础[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.