

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.004

单粒谷物体积排液法精确测量研究

刘双喜^{1,2} 孙林林¹ 付千悦¹ 王震¹ 张春庆³ 王金星^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018;

3. 山东农业大学农学院, 泰安 271018)

摘要:为解决现有比重瓶法测量谷物体积时操作复杂、工作量大、有毒等问题,进行单粒谷物体积排液法精确测量研究,结合图像处理技术和体积排液原理,提出一种单粒谷物体积排液法。该测量装置主要由标准白光光源、高精度线阵 CCD 相机、测量容器、谷物专用盛放装置、计算机等构成。该测量方法首先调节标准白光光源,增强图像采集环境,进行体积标定,计算单个像素点代表的实际体积 V_0 约为 0.002 3 mL;其次,使用高精度线阵 CCD 相机采集体积排液过程中测量容器内的液位图像;最后,运用差值法提取液位变化部分的图像,统计该部分图像所包含像素点个数,结合体积标定结果,计算体积。对同一批谷物分别使用单粒谷物体积排液法和比重瓶法测量每粒谷物体积,得到两组体积数据,单粒谷物体积排液法用时 12 min,比重瓶法用时 124 min。对两组数据分别使用格鲁布斯检验(T_A 、 T_B)、 F 检验(F_{AB})以及 t 检验(t_{AB})进行显著性差异检验,并将 3 种检验值与各自分布表中查得的临界值相比较: $(T_A, T_B) < T_{0.05, 100}$ 、 $F_{AB} < F_{0.025(99, 99)}$ 、 $t_{AB} < t_{0.05, 198}$, 均符合检验要求。结果表明:两组体积数据不存在显著性差异,单粒谷物体积排液法测量装置和方法能够快速、精确、无毒测量单粒不规则谷物体积,为科学研究和实际生产提供可靠的谷物体积数据。

关键词: 单粒谷物; 体积; 排液法; 线阵 CCD; 精确测量

中图分类号: TP391.41; S126 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)03-0036-07

Accurate Measurement of Single Grain Volume Draining Method

LIU Shuangxi^{1,2} SUN Linlin¹ FU Qianyue¹ WANG Zhen¹ ZHANG Chunqing³ WANG Jinxing^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments, Taian 271018, China

3. College of Agriculture, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: In order to solve the problems of complex operation, heavy workload and toxic when measuring the grain volume by the existing pycnometer method, the research on accurate measurement of single grain volume draining method was carried out. Combining the image processing technology and the volumetric principle of the liquid draining method, the device was mainly composed of a standard white light source, a linear CCD, a measuring container, a cereal dedicated holding device, a computer and the like. Firstly, the standard white light source was adjusted, the image acquisition environment was enhanced, volume calibration was performed, and the actual volume value V_0 was calculated, which was about 0.002 3 mL represented by a single pixel. Secondly, the liquid level image of measuring vessel was aquired by high accuracy linear CCD camera. Finally, the difference method was used to extract the image of the liquid level change; the number of pixels contained in this part of the image was counted, combining with the volume calibration results to calculate the volume value. Volume draining method and pycnometer method were used for the same batch of cereals respectively. Two sets of volume data were then obtained. Volumetric discharge took 12 min, and pycnometer method took 124 min. The two groups of data were tested by using the Grubbs test, F test and t test for significant differences tests, and the calculated test values were (T_A, T_B) , F_{AB} , t_{AB} . The values were compared with the critical value of their

收稿日期: 2017-10-23 修回日期: 2017-12-14

基金项目: 国家公益性行业农业科研专项(201303005)、山东省高等学校科技计划项目(J15LF08)、“双一流”奖补资金项目(SYL2017XTTD14)、国家级大学生创新计划项目(201710434249)和山东省现代农业产业技术体系创新项目

作者简介: 刘双喜(1978—),男,副教授,主要从事计算机视觉研究,E-mail: shuangxiliu168@163.com

通信作者: 王金星(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备和机器视觉研究,E-mail: jinxingw@163.com

distribution table: $(T_A, T_B) < T_{0.05,100}$, $F_{AB} < F_{0.025(99,99)}$, $t_{AB} < t_{0.05,198}$, and all of which met the inspection requirements. The results showed that there was no significant difference between the two sets of volume data. The accurate measuring device and method of volumetric discharge of single grain can quickly and precisely measure the volume of irregular single grain, and provide reliable grain volume for scientific research and actual production data.

Key words: single grain; volume draining method; linear CCD; accurate measurement

0 引言

谷物表型形状尤其是体积参数的简便、快速、准确测量在谷物科学研究中至关重要。测量外形不规则谷物体积通常使用排液法,但干燥谷物会快速吸水膨胀,产生测量误差,同时吸水后谷物内部会出现裂纹导致品质下降^[1]。为避免谷物吸水膨胀,实验室环境下常使用比重瓶法结合甲苯溶液测量谷物的平均体积。随着计算机与软件技术的快速发展,使得借助计算机技术测量不规则物体体积成为可能。根据测量原理的不同,不规则物体体积的测量技术主要分为激光传感测量^[2]和计算机视觉测量^[3-4],激光测量具有非接触、长距离和抗干扰的优点,更适合在户外大范围测量应用^[5-8]。在不规则物体测量方面,国内外学者已取得一些成就。RICCABONA等^[9]使用三维超声方法测量不规则物体体积。LEE等^[10]提出一种使用非破坏性方法测量不规则形状物体体积的机器视觉系统,以固定角度间隔旋转物体并拍摄物体轮廓,对不同视角获得的轮廓进行整合来重建物体的三维线框模型,通过在线框模型表面拟合近似测量物体体积。OMID等^[11]提出一种测量柑橘类水果体积的方法,使用两架相机采集水果的垂直视图,通过将果实图像分成多个基本的椭圆形截头圆锥体来计算水果体积。GONI等^[12]使用基于表面横截面设计的逆向工程方法进行固体食品材料的三维重建,使用计算机视觉系统获取不规则多维食品横截面的数字图像,开发了一种基于有限元法估测体积的方法。WANG等^[13]设计了一种低成本传感器,实现了自动计算对称农产品体积,将测量对象图像近似为基本右锥形截头圆锥体的总和来计算体积。JR等^[14]提出一种基于微机技术精确量化不规则形状物体的计算机断层扫描(CT)测量体积,并对物体进行三维重建。曹毓等^[15]针对形状不规则路面目标物提出的路面三维点云优化方法速度快,且三维重建效果及目标物的体积计算精度能满足实际要求。邢冀川等^[16]基于激光三角法研发了一种车厢体积测量系统,采用三阶灰度矩阵边缘检测算法精确提取车厢部分,通过车厢体积分割技术精确计算车厢体积。龚爱平等^[17]提出了基于三维线框模型的图像处理方法计算不规则类球体形状农

产品的体积,可较精确测量球体农产品的体积。

综合分析国内外研究现状,现有不规则物体体积测量方法主要面向外形特点显著且大体积物体,还无法精确测量不规则小物体体积。由于干燥的谷物体积小、形状不规则,为更精确测量谷物体积,本文设计一种单粒谷物体积排液法精确测量装置,使用高精度线阵 CCD 相机采集谷物测量过程中的液面图像,运用计算机处理液面图像,最终计算谷物体积,从而简化谷物体积测量工作,提高单粒不规则谷物体积测量精度和效率。

1 整体结构及工作原理

1.1 整体结构

单粒谷物体积排液精确测量装置主要由计算机、标准白光光源、高精度线阵 CCD 相机、CCD 调节装置、测量容器、谷物专用盛放袋、背景板、固定底板等构成,装置如图 1 所示。其中测量容器、谷物专用盛放袋和固定底板 3 部分组成测量部分,主要用于排液法测量单粒谷物体积。标准白光光源、高精度线阵 CCD、CCD 调节装置以及背景板构成图像信息采集系统,其中标准白光光源由 LED 灯条和 LED 专用散光板构成^[19],色温为 6 500 K^[18],营造最佳拍摄环境,以采集排液法测量体积过程中前后 2 次液面高度图像信息。计算机主要负责图像处理、液面高度变化值提取以及计算谷物体积。其中高精度线阵 CCD 相机选用 DALSA 的 PC-30-04K80 型彩色线扫描相机,像素为 4 096。背景板为绿色,测量容器内为水和墨水混合后的黑色溶液,以提高背景与

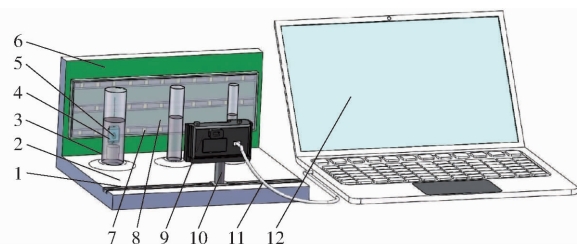


图 1 单粒谷物体积排液精确测量装置

Fig. 1 Accurate measuring instruments of single grain volume draining method

1. 水平调节滑轨 2. 固定底板 3. 测量容器 4. 谷物专用盛放袋 5. 谷物 6. 背景板 7. LED 灯条 8. LED 专用遮光板
9. 高精度线阵 CCD 相机 10. CCD 调节装置 11. 数据线 12. 计算机

前景物体的色彩对比度,便于提取液面高度。图2所示谷物专用盛放袋为柔性包膜材料,使用时排尽内部空气制成真空环境,保证盛放袋内部与谷物最大程度紧密贴合,避免存在空隙,在排液法测量体积过程中能够将干燥谷物与液体隔离,防止谷物吸水膨胀。

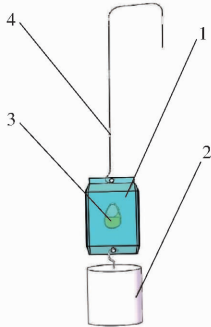


图2 谷物专用盛放装置

Fig.2 Grain-specific storage device

1. 谷物专用盛放袋 2. 载重物 3. 谷物 4. 拉绳

1.2 工作原理

单粒谷物体积排液精确测量装置工作时,首先向测量容器内倒入水和墨水的混合液体,通过 CCD 调节装置调节高精度线阵 CCD 相机的拍摄位置,调节标准白色光源,增强图像采集环境,使液位变化效果更易识别。其次,将未放入谷物的谷物专用盛放袋内部空气排出形成真空环境,用高精度线阵 CCD 相机采集该装置浸入测量容器前后液位图像,提取液位变化部分图像,统计该段图像所包含的像素个数,结合体积标定所建立的单个像素与实际体积之间关系,计算谷物专用盛放袋体积 V_1 。最后,将谷物放入谷物专用盛放袋,排尽内部空气,避免装置与谷物之间出现空隙,实现最大程度贴合,用线阵 CCD 相机采集该装置浸入测量容器后液位图像,再次计算此时体积 V_2 ,最终得到单粒谷物体积

$$V = V_2 - V_1 \quad (1)$$

其中,测量容器有多种内径规格,可根据谷物大小选用不同内径规格的测量容器。

2 测量装置标定

2.1 刻度选取

为建立实际体积与像素之间的关系,需根据高精度线阵 CCD 采集测量容器的图像信息进行体积标定^[20-21]。首先,在测量容器上选取 u 个刻度,每个刻度格代表 0.1 mL 体积;其次,用黑色纸条将该段刻度覆盖,覆盖范围从第一个刻度中间位置到最

后一个刻度中间位置;最后,利用高精度线阵 CCD 相机采集测量容器中轴线部位的图像信息,如图3所示,黑色部分是用来覆盖刻度的黑色纸条。

2.2 建立像素点与实际体积之间关系

采用计算机逐行遍历图3所示图像,提取图像上所有像素点的 RGB 值。由于所选取刻度区域已用黑色纸条覆盖,可限定 RGB 3 通道阈值 T_R 、 T_G 、 T_B 均为零,测量容器每个刻度代表体积为 0.1 mL,统计图像上满足 3 个限定阈值的全部像素点个数 N ,分别计算每个刻度格包含的像素个数 M_1 和每个像素代表的实际体积值 V_0 。

$$M_1 = \frac{N}{u} \quad (2)$$

$$V_0 = \frac{0.1}{M_1} \quad (3)$$

式中 u ——刻度格个数

2.3 体积标定结果

本次试验过程中体积标定时,选取刻度格个数 u 为 5,用黑色纸条覆盖后统计该段刻度所包含的像素点个数 N 为 219,运用式(2)计算每个刻度格所含像素个数 M_1 为 219/5,得到 M_1 后再通过式(3)求得单个像素表示的实际体积 V_0 为 0.002 3 mL。

2.4 最小测量精度校正

通过体积标定得到单粒谷物体积排液精确测量装置的最小测量精度为 0.002 3 mL,为验证其准确性,使用微量移液器进行校正。

选用北京川布兰生物技术开发有限公司生产的微量移液器,型号为 HST-MAP-H10、量取范围为 0.000 5~0.01 mL,由于最小测量精度为 0.002 3 mL,因此设定以 0.000 6 mL 为一定体积间隔进行校正。

先使用微量移液器在单粒谷物体积排液精确测量装置中装入适量液体,并采集液位图像,统计该图像所包含的像素个数 γ_1 ;然后使用微量移液器每次量取 0.000 6 mL 液体注入单粒谷物体积排液精确测量装置中,每次注入后统计此时单粒谷物体积排液精确测量装置内部液位图像所含的像素个数 γ_2 ;微量移液器前 3 次向单粒谷物体积排液精确测量装置注入液体时, $\gamma_2 = \gamma_1$,第 4 次注入时 $\gamma_2 - \gamma_1 = 1$,微量移液器 4 次注入液体总体积为 0.002 4 mL,由于 0.002 4 大于 0.002 3,当体积变化超过最小测量精度 0.002 3 mL 时,产生 1 个像素点的变化,因此最小测量精度为 0.002 3 mL 是准确的,单粒谷物体积排液精确测量装置可用于测量单粒谷物体积。

图3 测量容器中轴线部位图像信息

Fig.3 Image information of measuring vessel central axis

3 试验设计与单粒谷物体积计算

由于谷物种类繁多、形状不规则、体积较小、易受潮,采用现有测量技术难以准确测量干燥的单粒不规则谷物体积。为解决此问题,设计了一种单粒谷物体积排液精确测量装置,能够提高测量精确度和测量速率。

针对干燥玉米形状不规则、易吸水膨胀、体积难以精确测量的特点,选择玉米作为试验对象。设计对照试验,选取100粒干燥玉米,如图4所示,对每粒玉米分别使用单粒谷物体积排液法和比重瓶法测量体积。

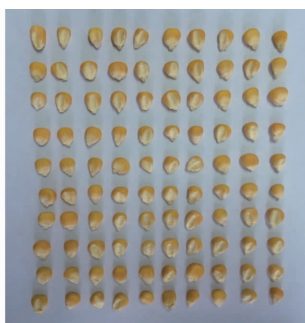


图4 百粒玉米图

Fig. 4 Diagram of one hundred corns



图5 图像处理过程

Fig. 5 Image processing

3.1.3 玉米体积计算

提取液位变化部分二值图像上每个像素点的RGB值,因图像为二值图像,黑色部分为液位变化部分图像,可限定阈值 $T=0$,统计在该阈值条件下该图像所含像素点个数 M_2 。体积标定得到每个像素代表的体积 V_0 ,计算玉米和谷物专用盛放袋总体积为

$$V_2 = V_0 M_2 \quad (5)$$

使用单粒谷物体积排液精确测量装置对100粒玉米进行体积测量,体积测量结果如图6所示,测量用时为12 min。

3.2 对照试验设计

为验证本文单粒谷物体积排液精确测量装置的测量正确率与测量速率,设计对照试验,对同一组玉米按相同顺序采用比重瓶法测量单粒玉米体积。

比重瓶法是实验室环境下测谷物体积的常

3.1 单粒谷物体积排液法

3.1.1 确定谷物专用盛放袋体积

测量谷物体积前确定谷物专用盛放袋的体积。使用高精度线阵CCD相机采集谷物专用盛放袋浸入测量容器前后液位图像,利用差值法处理高精度CCD相机前后2次采集的液位图像,提取测量前后液位变化部分图像,遍历统计该段图像上所有像素点个数,结合体积标定得到的单个像素点代表的实际体积,最终确定谷物专用盛放装置的体积 V_1 。

3.1.2 提取液面高度变化部分图像

将玉米放入谷物专用盛放袋后,使用高精度线阵CCD相机采集该装置浸入测量容器前后液位图像,并将图像上传至计算机。图像采集过程中环境不变,变化部分仅为谷物专用盛放装置浸入测量容器前后的液位变化。首先,分别提取液位变化前后图像所包含的每个像素点RGB值并存入数组 X 和 Y ;其次,计算两数组差的绝对值并保存到数组 Z 。

$$Z = \text{abs}(X - Y) \quad (4)$$

最后,将数组 Z 内RGB值转换为图像信息,并做单阈值分割,得到液位变化部分二值图像。具体图像处理过程如图5所示,图像尺寸为1像素 \times 4096像素,即高度为4096像素,宽度为1像素。

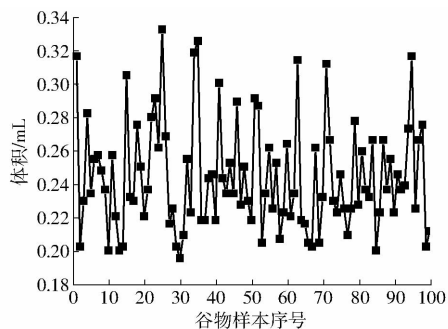


图6 单粒谷物体积排液法测量玉米体积结果

Fig. 6 Measurement result of volume by accurate measuring instruments

用方法,能够得到较为准确的多粒谷物体积,试验器材包括比重瓶、甲苯溶液、天平及蒸馏水。甲苯溶液为有毒易挥发液体,对人体伤害极大,且每测量一组谷物体积后就需要更换新的甲苯溶液,而更换后的废液需要专业设备集中处理,否则会造成环境污染和资源浪费;天平选用上海

精天电子仪器有限公司生产的 JA5003A 型电子精密天平,精度为 0.001 g;比重瓶仅用于盛放甲苯溶液,无刻度。

比重瓶法测体积过程中,用天平称得比重瓶质量为 m_0 后,在比重瓶中装满蒸馏水并用天平称得质量为 m_w ,再将蒸馏水倒出后在比重瓶中装满甲苯溶液用天平称得质量为 m_1 ,通过温度计测量蒸馏水的温度,并在密度表中查找蒸馏水密度 ρ_w (g/cm^3),计算甲苯溶液密度为

$$\rho_1 = \frac{m_1 - m_0}{m_w - m_0} \rho_w \quad (6)$$

测得甲苯溶液密度后,用天平称量每粒玉米质量 m_s 并装进比重瓶,然后向比重瓶中倒入甲苯溶液浸没玉米后轻轻摇动比重瓶,促使玉米表面及折痕处的空气排出。排尽空气后再将甲苯溶液装满比重瓶并称得质量 m_2 ,计算单粒玉米体积为

$$V_s = \frac{m_1 - m_2 + m_s}{\rho_1} \quad (7)$$

使用比重瓶法测量 100 粒玉米体积,测量结果如图 7 所示,测量用时为 124 min。

3.3 试验数据处理

同一组 100 粒干燥玉米用 2 种方法分别测量后,得到 2 组试验数据,为验证单粒谷物体积排液精确测量装置的测量正确性,对两组试验数据进行归纳、处理和分析。

表 1 基本统计结果

Tab.1 Basic statistical results

测量方法	最大值/mL	最小值/mL	平均值/mL	极差/mL	标准偏差/mL	用时/min
单粒谷物体积排液法(A)	0.333 5	0.195 5	0.244 5	0.138 0	0.033 1	12
比重瓶法(B)	0.328	0.187	0.242	0.141	0.032	124

3.3.2 格鲁布斯检验

为了剔除由于过失误差引起的异常数据,使用格鲁布斯检验法进行离散值检验。首先,将原始试验数据从小到大排序,并求得该组数据的平均值及标准偏差 S ;其次,计算统计量 T_i

$$T_i = \frac{\bar{x} - x_i}{S} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

最后,将统计量 T_i 与格鲁布斯检验值表中临界值 $T_{\alpha, n}$ 比较(α 为显著性水平,即把正常值判为异常值时错误的概率, n 为样本量),如果 $T_i \geq T_{\alpha, n}$,说明 x_i 为离散值,必须舍去,反之予以保留。

结合两种测量方法所测得的百粒玉米体积试验数据,分别求出各自最大值和最小值的统计量 T : $T_{Amin} = 1.480 4$, $T_{Amax} = 2.688 8$, $T_{Bmin} = 1.718 7$, $T_{Bmax} = 2.687 5$,则 $T_{Amin} \leq T_A \leq T_{Amax}$, $T_{Bmin} \leq T_B \leq T_{Bmax}$;查询格鲁布斯检验值表,取 $\alpha = 0.05$, $T_{0.05, 100} = 3.21$,将

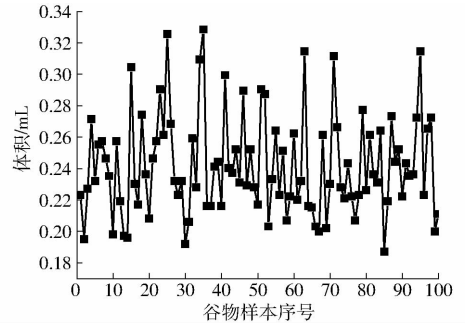


图 7 比重瓶法测量体积结果

Fig.7 Measurement result of volume by pycnometer method

3.3.1 基本统计处理

对 2 组试验数据进行基本统计计算,分别求出单粒谷物体积排液精确测量装置和比重瓶法所测得体积结果的最大值、最小值、平均值、极差以及标准偏差,为格鲁布斯检验、 F 检验和 t 检验做准备,其中平均值和标准偏差分别为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (8)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (9)$$

式中 x_i ——样本值 n ——样本总数

同时,统计测量同一批谷物时 2 种测量方法所用时间。结果见表 1。

T_{Amin} 、 T_{Amax} 、 T_{Bmin} 、 T_{Bmax} 分别与 $T_{0.05, 100}$ 比较,均小于 $T_{0.05, 100}$,因此 2 组原始数据无离散值,证明数据有效、准确。

3.3.3 F 检验

数据的标准偏差 S 可以反映该组数据的精度,不同组数据有不同的精度,检验 2 组数据精度之间有无显著性差异需进行 F 检验。首先,计算 F 值为

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (S_1^2 \geq S_2^2) \quad (11)$$

其次,查询 F 分布表中临界值 $F_{\frac{\alpha}{2}(n_1-1, n_2-1)}$ (n_1 、 n_2 分别为 2 组数据的样本量),若 $F \leq F_{\frac{\alpha}{2}(n_1-1, n_2-1)}$,则说明 2 组数据精度之间不存在显著性差异,反之,则存在显著性差异。

结合表 1 中两组数据的标准偏差, $S_A = 0.033 1$, $S_B = 0.032$, $S_A^2 > S_B^2$, $F_{AB} = \frac{S_A^2}{S_B^2} = 1.069 9$ 。取 $\alpha =$

0.05, 则 $F_{0.025(99,99)} = 1.76$, 即 $F_{AB} < F_{0.025(99,99)}$, 因此 2 组数据测量精度无显著性差异。

3.3.4 t 检验

为比较 2 组数据平均值之间是否存在显著性差异, 需进行 t 检验。由于 2 组试验数据的样本量相同, 计算 t 值为

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{n}{S_1^2 + S_2^2}}} \quad (12)$$

将计算后所得 t 值与 t 分布表中的 $t_{\alpha, (n_1 + n_2 - 2)}$ 比较, 如果 $t \leq t_{\alpha, (n_1 + n_2 - 2)}$, 则说明 2 组数据平均值之间无显著性差异。

结合表 1 数据, 计算后所得 $t_{AB} = 0.543 0$, 同时取 $\alpha = 0.05$, $t_{0.05, 198} = 1.98$, 即 $t_{AB} < t_{0.05, 198}$, 因此 2 组数据平均值之间不存在显著性差异。

3.3.5 数据处理结果分析

由上述格鲁布斯检验、 F 检验、 t 检验 3 组检验结果可知, 2 组试验数据之间无显著性差异, 表明 2 种测量方法均可实现精确测量单粒谷物体积; 由于比重瓶法测量体积过程中使用的甲苯溶液为易挥发有毒液体, 经测量后谷物需通过专业设备处理, 避免危害环境, 因此谷物无法循环利用, 造成一定程度的浪费。而单粒谷物体积排液法测量环境无毒、快捷, 测量后的谷物可重复使用, 节约谷物资源。因此, 单粒谷物体积排液法可以代替比重瓶法测量单

粒谷物体积, 并保证高精度测量。

4 结论

(1) 提出一种快速精确无毒的单粒谷物体积排液法, 根据干燥谷物体积小且形状不规则的特点, 在色温 6 500 K 的标准白光下采集测量图像, 增强液位变化识别度, 结合图像处理技术和排液法测体积原理实现准确测量干燥谷物体积。

(2) 设计了一种谷物防吸水专用盛放装置, 测量时采用柔性包膜将干燥谷物与液体隔离并抽出内部空气, 使包膜与谷物表面最大程度贴合。该装置可避免干燥谷物吸水膨胀后损坏内部结构。影响体积测量准确率及种子自身完整性。通过对照试验, 发现该装置与常规测量方法测量结果相符合, 满足测量要求。

(3) 测量同一组谷物体积时, 单粒谷物体积排液法用时 12 min, 比重瓶法用时 124 min; 对单粒谷物体积排液法测量结果与比重瓶法测量结果分别使用格鲁布斯检验、 F 检验、 t 检验作分析对比: $(T_A, T_B) < T_{0.05, 100}$ 、 $F_{AB} < F_{0.025(99,99)}$ 、 $t_{AB} < t_{0.05, 198}$, 结果满足检验要求, 证明 2 组体积数据之间无离散值, 且精度和平均值无差异。因此, 单粒谷物体积排液法能够解决比重瓶法测体积过程中有毒、操作复杂以及资源浪费的缺点, 实现快速、精确、无毒测量单粒不规则谷物体积。

参 考 文 献

- 1 华云龙, 傅志一, 秦太验, 等. 关于谷物湿膨胀系数的讨论[J]. 农业工程学报, 1998, 14(2): 209 - 214.
HUA Yunlong, FU Zhiyi, QIN Taiyan, et al. Discussions on hygroscopic expansion coefficient of grains[J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(2): 209 - 214. (in Chinese)
- 2 任春华, 陈灿, 王满喜, 等. 一种惯性测量与距离组合的定位修正方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11): 2513 - 2519.
REN Chunhua, CHEN Can, WANG Manxi, et al. Research on a positioning correction method with inertial measurement in combination with distance [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(11): 2513 - 2519. (in Chinese)
- 3 占栋, 于龙, 肖建, 等. 多摄像机结构光大视场测量中全局标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4): 903 - 912.
ZHAN Dong, YU Long, XIAO Jian, et al. Study on multi-cameras and study structured-light vision system calibration approach study in large field view measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(4): 903 - 912. (in Chinese)
- 4 沈彤, 刘文波, 王京. 基于双目立体视觉的目标测距系统[J]. 电子测量技术, 2015, 38(4): 52 - 54.
SHEN Tong, LIU Wenbo, WANG Jing. Distance measurement system based on binocular stereo vision [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(4): 52 - 54. (in Chinese)
- 5 ROSEN B G, BAATH L, DIMKOVSKI Z. On variation of surface topography and robust product performance [C] // The 4th International Symposium on Test Automation and Instrumentation (ISTAI'2012), 2012: 8 - 11.
- 6 周美丽, 白宗文. 基于 2D-PSD 的激光位移测量系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(2): 64 - 66.
ZHOU Meili, BAI Zongwen. Design of the laser displacement measurement system based on 2D-PSD [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(2): 64 - 66. (in Chinese)
- 7 史红梅, 张继科. 基于激光三角测量原理的规矩检测系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 34(9): 1934 - 1940.
SHI Hongmei, ZHANG Jike. Study on track gauge measurement system based on laser triangulation principle [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 34(9): 1934 - 1940. (in Chinese)
- 8 赵其杰, 孟庆桐, 张曦, 等. 基于基准面提取的物料体积在线测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12): 2731 - 2737.
ZHAO Qijie, MENG Qingxu, ZHANG Xi, et al. On-line measurement method for material volume based on reference plane extraction[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12): 2731 - 2737. (in Chinese)
- 9 RICCABONA M, NELSON T R, PRETORIUS D H, et al. Distance and volume measurement using three-dimensional

- ultrasonography[J]. Journal of Ultrasound in Medicine Official Journal of the American Institute of Ultrasound in Medicine, 1995, 14(12):881.
- 10 LEE D J, XU Xiaoqian, EIFERT J, et al. Area and volume measurements of objects with irregular shapes using multiple silhouettes [J]. Optical Engineering, 2006, 45(2):409 - 411.
- 11 OMID M, KHOJASTEHNZHAND M, TABATABAEFFAR A. Estimating volume and mass of citrus fruits by image processing technique [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(2):315 - 321.
- 12 GONI S M, PURLIS E, SALVADORI V O. Three-dimensional reconstruction of irregular foodstuffs [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(4):536 - 547.
- 13 WANG T Y, GUANG S K. Low-cost sensor for volume and surface area computation of axis-symmetric agricultural products [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(3):870 - 877.
- 14 JR A R, FRAM E K. Microcomputer-based technique for 3-D reconstruction and volume measurement of computer tomographic images. Part 1: Phantom studies [J]. Investigative Radiology, 1989, 23(12):881 - 885.
- 15 曹毓,冯莹,杨云涛,等. RANSAC 平面估计算法在路面物体体积测量中的应用[J]. 传感技术学报, 2012, 25(3):413 - 416.
CAO Yu, FENG Ying, YANG Yuntao, et al. Application of plane estimation algorithm based on ransacking volume measurement of object on road surface [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(3):413 - 416. (in Chinese)
- 16 邢冀川,罗小红. 利用激光三角法测量货车车厢体积[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11):3083 - 3087.
XING Jichuan, LUO Xiaohong. Measurement of truck carriage volume with laser triangulation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11):3083 - 3087. (in Chinese)
- 17 龚爱平,张卫正,何勇,等. 基于三维线框模型的一类球体农产品体积和表面积测量[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7):338 - 344. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160746&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.046.
GONG Aiping, ZHANG Weizheng, HE Yong, et al. Measurement of volume and surface area for spheroid agricultural product based on 3D wire frame model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7):338 - 344. (in Chinese)
- 18 张晨,孙世磊,石文轩,等. 工业线阵 CCD 相机系统测试与噪声评估[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10):2532 - 2539.
ZHANG Chen, SUN Shilei, SHI Wenxuan, et al. Linear CCD camera system for industry measurement and its noise evaluation [J]. Editorial Office of Optics and Precision Engineering, 2016, 24(10):2532 - 2539. (in Chinese)
- 19 余淑华,刘艳丽,王世璞,等. 脱绒棉种色选机双 CCD 检测系统设计与仿真分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9):55 - 61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150908&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.008.
YU Shuhua, LIU Yanli, WANG Shipu, et al. Design and simulation analysis of dual CCD detection system for delinted cottonseeds color sorter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):55 - 61. (in Chinese)
- 20 吴国栋,韩冰,何煦. 精密测角法的线阵 CCD 相机几何参数实验室标定方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10):1628 - 1632.
WU Guodong, HAN Bing, HE Xu. Calibration of geometric parameters of line-array CCD camera based on exact measuring angle in lab [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(10):1628 - 1632. (in Chinese)
- 21 胡英辉,袁峰,李凯,等. 多线阵 CCD 位姿测量光学系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10z):16 - 21.
HU Yinghui, YUAN Feng, LI Kai, et al. Multiple linear CCD pose measuring optical system [J]. Editorial Office of Optics and Precision Engineering, 2015, 23(10z):16 - 21. (in Chinese)