doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.030

基于单目视觉的谷物联合收获机产量测量方法

曾宏伟　雷军波　陶建峰　刘成良
(上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 为准确获取农田中作物产量信息,以联合收获机刮板式升运器为研究对象,提出了一种基于单目视觉的联合收获机产量测量方法。首先,根据真实的升运器内部谷堆图像,提出了一种更加精确的刮板上谷物堆积模型。然后,基于视觉测量和图像处理技术,开发了一种谷堆体积测量方法。在辅助光源照射下,通过工业相机采集升运器内刮板和谷堆的侧面图像。采用邻域微分法提取图像感兴趣区域,再利用 Otsu 法和形态学处理方法从背景中准确分割出谷堆。根据相机成像模型,计算谷堆在世界坐标系中的实际侧面积,并通过谷堆几何模型得到谷物的体积。最后,将每个刮板上的谷堆体积累加求取产量。为验证所提方法的有效性,搭建了基于单目视觉的谷物测产系统,并在升运器试验台上开展了试验验证。试验结果表明,在不同的升运器转速工况下,所提方法测量的相对误差为 -4.08% ~3.41%,能够满足联合收获机产量测量精度要求。

关键词: 联合收获机; 产量测量; 单目视觉; 图像处理
中图分类号: S225.3; S126　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)12-0281-09　　**OSID**:

Yield Monitoring for Grain Combine Harvester Based on Monocular Vision

ZENG Hongwei　LEI Junbo　TAO Jianfeng　LIU Chengliang
(*State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration*, *Shanghai Jiao Tong University*, *Shanghai* 200240, *China*)

Abstract: It is of great significance to accurately obtain the crop yield distribution information of farmland, which can provide decision-making basis for fine farmland management. However, due to the serious grain falling in the harvester elevator, the traditional photoelectric sensor is prone to triggering by mistake, and the grain falling is random, so the error is difficult to correct and eliminate. In order to improve the accuracy of yield monitoring, a method of grain yield measurement based on monocular vision was developed, which can be used in the combine harvester with scraper elevator. Firstly, a more accurate geometric model of grain heap on the scraper was established according to the real images of grain pile in elevator. Then, a volume measurement method of the grain heap was developed based on vision measurement and image processing technology. Under the illumination of the auxiliary light source, the image of the scraper and grain heap in grain elevator was collected by an industrial camera. The neighborhood differentiation-based method was put forward to extract the region of interest of the image, and then the Otsu method and morphological processing were used to accurately segment the grain piles from the background. According to the camera imaging model, the actual side area of the grain pile in the world coordinate system was calculated, and the grain volume was obtained through the geometric model of the grain pile. Finally, the volume of grain pile on each scraper was accumulated to obtain the grain yield. To verify the effectiveness of the proposed method, a grain yield measurement system based on monocular vision was built, and experiments were carried out on the elevator experiment bench. The results showed that the relative error measured by the proposed method was between -4.08% and 3.41% at different elevator speeds, which can meet the accuracy requirements of grain yield monitoring for the combine harvester.

Key words: combine harvester; yield monitoring; monocular vision; image processing

收稿日期: 2020-12-30　修回日期: 2021-02-04
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700105)和上海交通大学新进教师启动计划项目(18X100040003)
作者简介: 曾宏伟(1996—),男,博士生,主要从事智能农机装备研究,E-mail: zenghw@sjtu.edu.cn
通信作者: 陶建峰(1975—),男,副教授,博士生导师,主要从事智能液压传动与控制技术研究,E-mail: jftao@sjtu.edu.cn

0 引言

智能农业装备是未来农业机械发展的重要方向,先进的感知技术是实现农业装备智能化的基础[1]。在收获机械中,农田中作物产量分布信息的准确获取能够为农田精细化管理提供决策依据,具有重要意义[2]。因此,高精度的测产系统是提高收获机械智能化水平的关键技术之一,能够在未来农业智能化生产作业中发挥重要作用。

谷物产量测量传感器是谷物测产系统中最重要的组成部分。按测量原理分类,谷物测产传感器主要包括质量流式和体积流式 2 类[3-4]。质量流式传感器直接测量单位时间内进入粮仓的谷物质量,常见的有冲量式[5-8]、称量式[9-10]和辐射式[11-12]。其中,冲量式传感器由于结构简单、成本低、安装方便而得到广泛应用,但其校准过程繁琐,且精度易受机器振动、车辆倾角等影响,在真实田间环境下测量精度不稳定。称量式传感器结构较为复杂,且易受到机身振动和谷物流量变化引起的冲击干扰。辐射式传感器通过测量伽马射线或 X 射线的衰减系数获得谷物的质量流,具有较高精度,但由于具有放射性,易对人体造成伤害,其发展和应用受阻。

体积流式传感器通过测量谷物的体积流量,间接获得谷物的质量流量。目前较普遍的方法是采用光电传感器测量谷物的体积,包括对射式和反射式等。此类方法均需提前抽象出谷堆的几何形状,然后通过测量谷堆的厚度再计算出体积流量[13-15]。然而,由于收获机作业过程中升运器内部会存在较严重的谷物掉落,此类通过光路通断测量刮板上谷物厚度的方法均存在误触发问题,且谷物的掉落具有随机性,误差难以矫正和消除。

相比于红外光电传感器,视觉信息更为丰富,被逐渐用于收获机的产量测量中[16-19]。ZHAO 等[17]基于水稻穗部二维图像构建了水稻产量快速预测模型,该方法能够初步估计水稻的田间产量,但前提是假设稻田中麦穗长势是均匀的,且无法获得区域产量分布信息。尹文庆等[18]在实验室采用普通滑槽作为输送器,利用线结构光视觉测量流经滑槽的谷粒截面轮廓,采用梯形微元求和法计算谷物的体积流量。杨刚等[19]基于线结构光三维视觉测量技术开展了谷物测产系统研究,事先将刮板上谷堆形貌近似简化成规则的几何模型,然后通过结构光视觉测量技术得到谷堆的厚度,进而计算出谷物的体积流量。然而,在构建刮板上谷堆几何模型时,谷堆上表面被近似为一个平面,而实际上升运器运动过程中谷堆上表面并非严格的平面,这给谷物体积流量的测量带来了误差。

视觉测量是机器视觉最广泛的应用之一,常用于物体的三维重构以及尺寸检测等[20-21]。根据摄像头数量不同,视觉测量又分为单目视觉测量和双目视觉测量。单目视觉测量方法快速、简单,但应用场景受限,需满足一定条件才能保证准确度。双目视觉通过图像变换和特征匹配获取图像的深度信息,适用范围广、精度较高,但计算过程复杂、耗时长。在联合收获机中,升运器转速较高,要求图像处理算法具有高时效性。此外,升运器内部图像较为单一,单目视觉测量精度能够得以保证。

基于上述分析,为减小刮板上谷堆形貌近似过程中造成的误差,更加准确地反映谷堆的真实几何形貌,本文提出一种基于单目视觉的谷物体积流量测量方法。首先通过工业相机获取升运器内刮板和谷堆的侧面图像,采用邻域微分法提取谷堆图像区域,再利用 Otsu 法对图像进行分割并得到谷堆侧面的像素面积,然后通过相机成像模型得到谷堆在世界坐标系中的真实侧面积,最后通过体积模型计算得出谷物的体积流量,进而获得谷物产量。

1 基于单目视觉的谷物测产原理

谷物联合收获机作业过程中,作物从田间收割到进入粮仓需要进行脱粒、清选、输送等一系列工序。谷物产量的测量通常在将谷物输送粮仓的装置中进行。目前,粮仓内广泛采用的输送装置主要包括刮板式运输器、螺旋式运输器和抛扬器等。本文针对刮板式输送装置,开展了谷物体积流式测产研究。首先建立刮板上谷堆体积计量模型,然后利用机器视觉和图像处理技术获取刮板谷堆的截面积,再结合建立的谷堆体积模型计算出每个刮板上的谷堆体积,最终得到谷物体积流量以及产量。

1.1 谷物计量模型

刮板式升运器内部构造如图 1 所示,其由链轮、套筒链条以及刮板组成。橡胶刮板安装在链条上随链条一起转动,将谷物从升运器底部运送到上端,然后抛撒至粮仓中。通过测量单个刮板上的谷物体积,即可获得升运器内谷物的体积流量,再根据谷物的容重就能求得谷物质量流量,收获机的总产量即为每次经过刮板上的谷物质量累加和。由此可见,刮板上谷堆体积模型的准确度直接决定了最终产量的测量精度。

在文献[13-14,19]中,通常将谷堆的形状近似为一个棱柱,假设谷堆的上表面为一个平面,然后通过测量谷堆侧面某一位置的厚度对谷堆的体积进行计算。然而在实际作业过程中,刮板谷堆

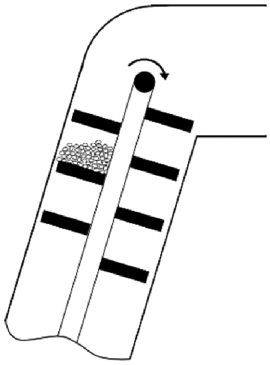
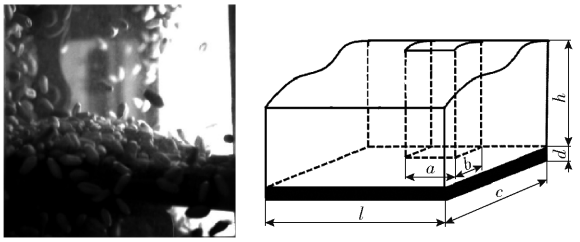


图 1　刮板式升运器结构图

Fig. 1　Structure diagram of scraper elevator

上表面并非标准的平面。由于升运器运转过程中存在振动，谷物会从刮板四周的间隙掉落，使得谷堆上表面成为一个中间高、四周低的曲面，如图 2a 所示。为更准确地描绘谷堆形貌、提高测产精度，建立如图 2b 所示的谷堆几何模型，忽略刮板谷堆短边两侧的塌陷，近似为一个以侧面进行拉伸的几何体。



(a) 刮板上谷堆实拍图像　　(b) 刮板谷堆体积模型

图 2　谷堆近似几何模型

Fig. 2　Approximate geometric models of grain pile

在图 2b 中，l、c、d 分别为刮板长度、宽度和厚度，a、b、h 分别是链条所占的区域长、宽和高，在同型号的收获机上均为常量。记 V_{grain} 为谷堆实际体积，V_{total} 表示包含刮板在内的规则几何体的体积，V_{scrapper} 为刮板体积，V_{chain} 代表链条所占的体积，则谷堆体积 V_{grain} 计算式为

$$V_{\text{grain}} = V_{\text{total}} - V_{\text{scrapper}} - V_{\text{chain}} \tag{1}$$

其中

$$V_{\text{scrapper}} = lcd \tag{2}$$

假设谷堆和刮板的截面面积为 S，规则几何体的体积 V_{total} 计算式为

$$V_{\text{total}} = lS \tag{3}$$

为简化计算，链条所占的体积 V_{chain} 通过将其近似为长方体进行计算，即

$$V_{\text{chain}} = ab(d+h) \tag{4}$$

综合式(1)～(4)，则实际体积 V_{grain} 可以表示为

$$V_{\text{grain}} = l(S-dc) - ab(d+h) \tag{5}$$

可以看出，式(5)中只存在 2 个变量：S 和 h。利用机器视觉技术测量 S 和 h，并提前标定待收割谷物的容重 γ，则单个刮板上的谷物质量 m_i 为

$$m_i = \gamma V_{\text{grain}} \tag{6}$$

将经过的 n 个刮板上谷物质量相加，即可得到收获的谷物总质量 M 为

$$M = \sum_{i=1}^{n} m_i \tag{7}$$

1.2　单目视觉测量原理

在联合收获机中，粮仓升运器内部链轮转速最高可达 500 r/min 以上，此时相邻刮板经过相同位置的时间差约 50 ms。换而言之，单个刮板上谷物质量的测量和计算要在 50 ms 内完成，在部分收获机中链轮转速更高，这对图像处理算法的速度提出了较高的要求。同时，在谷物流量测量中相机与被测物体相对位置是固定的，且距离较近，在此条件下，单目视觉测量的精度得到了保证。综上考虑，本文采用单目相机拍摄刮板上谷堆侧面图像，进行谷堆的侧面积测量。

单目相机尺寸测量原理主要是相机的成像模型[22]，本文主要测量图像中谷堆的尺寸信息，不需要测量谷堆相对世界坐标系的具体位置，因此无需考虑世界坐标系，相机成像示意图如图 3 所示。

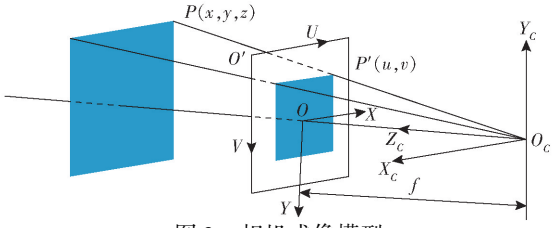


图 3　相机成像模型

Fig. 3　Camera imaging model

在图 3 中，$O_C X_C Y_C Z_C$ 为相机坐标系，XOY 为图像坐标系，$UO'V$ 为像素坐标系，$O_C Z_C$ 为相机的光轴，f 为镜头焦距。对于相机坐标系中的点 $P(x,y,z)$，其通过透镜成像后在像素坐标系的坐标记为 $P'(u,v)$，像点 P' 和物点 P 之间的变换关系可表示为

$$z\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中　f_x、f_y——水平、竖直方向的像素焦距

u_0、v_0——主点水平、竖直方向的像素偏移量

当物平面与像平面平行时，z 为固定值，物平面内两点间的实际距离和其在像平面内的像素距离成比例，可表示为

$$\begin{cases} \Delta x = \dfrac{z}{f_x}\Delta u \\ \Delta y = \dfrac{z}{f_y}\Delta v \end{cases} \tag{9}$$

式中　Δx、Δy——水平、竖直方向的实际距离

Δu、Δv——水平、竖直方向的像素距离

根据式(9)可知，当被测平面与相机平行时，可

以通过标定获得物体实际尺寸与像素尺寸比例,从而实现单目相机的尺寸测量。在本文所提方法中,相机平行于升运器外壳安装在升运器侧面。在整个测量过程中,相机位置固定不动,其与刮板侧面为固定值。因此,根据上述原理可以测量出刮板谷堆侧面的面积。需要注意的是,安装会存在误差,理论上很难保证相机与刮板的侧面严格平行,但相机与刮板实际距离较小,轻微角度偏差对测量结果影响较小。

2 图像处理方法

在升运器高速运转的情况下,图像处理的时效性显得至关重要。为减少算法处理的数据量,提高计算速度,采用灰度相机进行升运器内部刮板上谷堆图像的采集。在正式采集图像前,需对相机进行标定以获取相机内部参数,然后采用一系列图像处理方法得到谷堆的侧面积,最终利用谷堆体积模型计算出谷物的体积流量。

2.1 相机标定

根据相机成像模型可知,当从二维图像中获取三维信息时,需要先获取相机的内部参数,求解相机内部参数的过程即为相机的标定。同时,由于透镜不可避免地存在制造和装配误差,会使图像产生横向畸变和切向畸变,给测量带来误差。图像的畸变可通过相机标定获取畸变参数然后对原图像进行去畸变处理来矫正消除。本文采用 ZHANG[23] 提出的平面棋盘格法进行相机标定,从不同角度采集了 20 幅平面棋盘格靶标图像进行标定。标定结果如表 1 所示,包括相机内部参数以及畸变参数。

表 1 相机标定结果

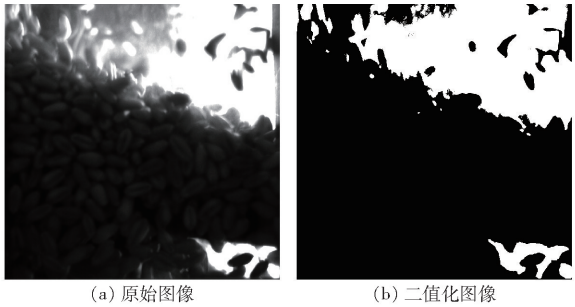
Tab. 1 Result of camera calibration

相机内部参数	数值	畸变参数	数值
f_x/像素	1 726. 159	k_1	-0. 082
f_y/像素	1 732. 347	k_2	-0. 205
u_0/像素	661. 440	k_3	-0. 003
v_0/像素	487. 445	p_1	0. 002
		p_2	2. 915

注:k_1、k_2、k_3为径向畸变系数,p_1、p_2为切向畸变系数。

2.2 感兴趣区域提取

灰度相机在减少数据量的同时也减少了图像所包含的信息,如何从灰度图像中正确分离出谷堆区域成为单目视觉谷物流量测量的关键。在相机拍摄的图像中,除了谷堆和刮板,还会出现链条、升运器内壁等背景,且部分背景的灰度和谷堆的灰度极其相近。如果直接对图像进行二值化处理,很难将背景和谷堆区分开来。图 4a 所示为升运器在 240 r/min 转速下相机采集的图像,对其直接进行二值化处理的结果如图 4b 所示。



(a) 原始图像 (b) 二值化图像

图 4 二值化结果

Fig. 4 Binaryzation processing result

从图 4 中看出,直接将刮板图像二值化后无法分辨出谷堆和背景,难以准确计算谷堆的侧面积。仔细观察图 4a 可以发现,在空间分布上,谷堆是一个完整的连通区域,总体上近似为一个梯形。因此,将图像中灰度按行累加,结果如图 5 所示,图中绿色实线为灰度按行累加后的趋势曲线。为方便观察,各行的灰度累加值已进行等比缩小处理。

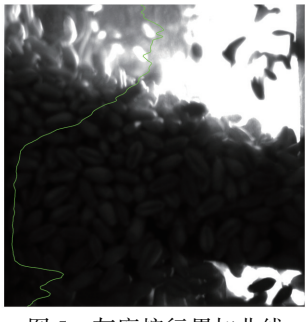


图 5 灰度按行累加曲线

Fig. 5 Curve of gray values accumulation by rows

从图 5 中可以看出,在谷堆与背景的分界处灰度累加曲线有明显的阶跃,这是因为在辅助光源的照射下,背景区域整体偏白色,而谷堆区域呈黑色。由于谷物水平堆积在刮板上,将图像灰度按行累加后,谷堆区域所在行的灰度总值明显低于背景区域。据此,可以分析灰度累加曲线的梯度变化来确定谷堆的真实区域。

传统方法通常采用一阶后向差分计算一维离散曲线的梯度变化,但容易受噪声干扰。为减少图像中正掉落谷物等噪声的影响,准确提取出谷堆实际区域作为图像处理的感兴趣区域(Region of interest, ROI),基于邻域均值的差分算法[24]计算灰度累加曲线的梯度。对于离散数列中第 i 个数据点 x_i,其梯度 $\mathrm{d}x_i$ 为目标点左侧相邻 L 个数据点的均值与右侧相邻 L 个数据点均值的差值,计算公式为

$$\mathrm{d}x_i = \frac{\sum_{k=i-L}^{i} x_k - \sum_{k=i}^{i+L} x_k}{L} \quad (i = L+1, L+2, \cdots, N-L) \tag{10}$$

式中　N——离散数列长度

L——邻域长度

相比于一阶差分算法，该方法考虑了目标像素行两侧相邻区域的灰度情况，能够有效过滤高频噪声。取 $L=12$，对图 5 中灰度累加曲线进行邻域均值差分计算，结果如图 6 所示。

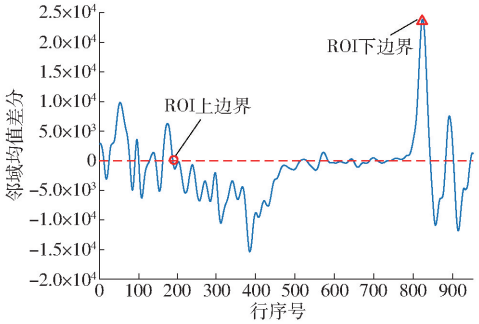


图 6　邻域均值差分曲线

Fig. 6　Difference curve of neighborhood mean

由图 6 可以看出，邻域均值差分曲线较平滑。由于升运器安装时存在倾角，谷堆上表面通常与刮板不平行，在寻找谷堆上边界时应定位谷堆表面的最高位置处，以包含整个谷堆区域。而如果直接选择灰度下降最大的位置作为谷堆区域上界，通常会定位为谷堆表面的最低处。观察图 5 可以发现，从谷堆表面的最高点开始，图像中每一行小麦占的比重逐渐增加，累计灰度逐渐减小。因此，可以选择邻域微分值从正变为负的零点处作为谷堆上边界。由于存在谷物掉落，邻域差分曲线中会存在多处满足要求的零点，但自谷堆上表面最高点往下，每一行灰度之和会逐渐减小，灰度均值差分值会在较大范围内保持为负值。因此，可以选择邻域均值差分曲线中最长连续负区间中的左端点作为 ROI 上边界，如图 6 中圆圈位置。对于谷堆区域下边界，图像从暗变亮，灰度通常会增加，因此选择上边界之后序列中邻域均值微分最大点作为下边界点，如图 6 中三角形所在位置。综上所述，提取图像中谷堆区域的算法流程为：①对图像的灰度值按行累加，获得灰度累加曲线。②对灰度累加曲线进行邻域均值差分计算。③寻找邻域均值差分序列中最长连续负区间，选择该区间左端点作为 ROI 区域上边界。④从上边界点往后搜索邻域均值差分最大值，选择其位置作为区域下边界。

对于图 4 所示图像，通过上述算法提取的谷堆区域如图 7 所示，其完整地包含了谷堆和刮板。

2.3　形态学处理

在准确获取刮板和谷堆的区域后，可直接对提取的 ROI 进行二值化处理，将图像中深色的谷堆从浅色背景中分割出来。Otsu 法是最常用的二值化方法之一，其利用最大类间方差自动确定最佳阈值，对于前景和背景区别较大的图像具有良好的分割效果。本文采用 Otsu 法对 ROI 图像二值化，结果如图 8a 所示。

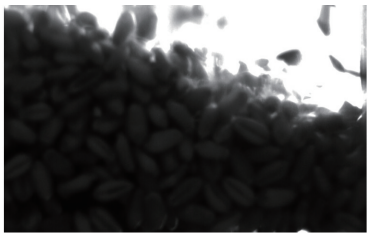
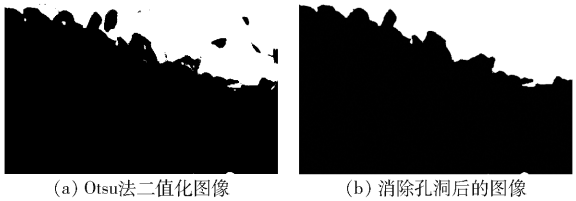


图 7　提取的 ROI

Fig. 7　Extracted region of interest



(a) Otsu法二值化图像　　(b) 消除孔洞后的图像

图 8　形态学处理结果

Fig. 8　Morphological processing result

从图 8a 中可以看出，Otsu 法分割效果良好，能准确地分割出谷堆和刮板。然而，掉落的谷粒也被划分为前景，而谷堆中部分过曝的区域成为封闭的孔洞。为此采用 floodfill 算法对二值图进行处理，消除二值图中掉落的谷粒和谷堆内过曝光区域，结果如图 8b 所示。为展示上述算法提取的谷堆区域的准确性，将图 8b 中谷堆边界绘制在原始图像中，如图 9 所示。可以看出，通过上述算法最终分割得到的谷堆区域与真实的谷堆高度吻合，准确地勾勒出了谷堆的边界，为后续谷物体积的高精度计算奠定了基础。

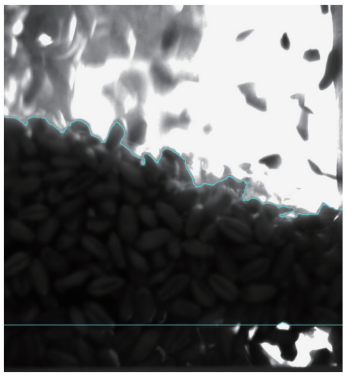


图 9　图像分割结果

Fig. 9　Image segmentation result

2.4　谷堆截面积计算

通过相机标定，得到了相机内部参数 f_x、f_y。同时，利用图像处理方法精确地提取了谷堆图像区域。结合式(9)，则谷堆真实截面积为

$$S = Q\frac{D_z^2}{f_x f_y} \tag{11}$$

式中 Q——谷堆二值图前景像素总数

D_z——相机与刮板侧面的距离

取谷堆第 1 列高度作为链轮占据的高度,其计算公式为

$$h = C_1\frac{D_z}{f_y} \tag{12}$$

式中 C_1——谷堆二值图中第 1 列像素数

由式(5)~(7)即可获得谷物产量。

3 试验验证与分析

3.1 谷物产量测量系统

为采集升运器内部刮板及谷堆图像,搭建了如图 10 所示的谷物测产系统,其主要包括工业相机、辅助光源、接近开关、图像处理设备以及 CAN 通信模块等。工业相机用于采集刮板上谷堆原始图像,接近开关则作为工业相机采集图像的外部触发源。当接近开关检测到刮板经过时,触发工业相机采集当前刮板图像。由于升运器是封闭的,需要安装辅助光源提供必要的光线,保证成像质量。采集的图像在图像处理设备中处理和分析,得到当前刮板上谷堆的侧面积,然后根据体积模型计算谷堆质量。由于处理设备本身没有 CAN 控制器和收发器,因此测得的传感信息通过 USB 转 CAN 模块发送到收获机 CAN 总线上,最终在车载终端上显示和保存。

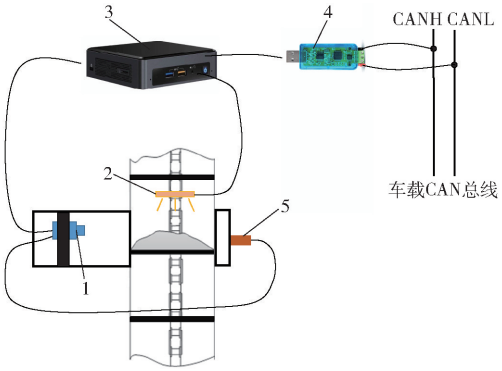


图 10 谷物产量测量系统

Fig. 10 Grain yield monitoring system

1. 工业相机 2. 辅助光源 3. 图像处理设备 4. USB 转 CAN 模块 5. 接近开关

工业相机型号为大恒 MER-131-210U3M,采用 CMOS 传感器,分辨率为 1 280 像素 × 1 024 像素,帧率为 210 f/s,使用 USB 3.0 接口,可外触发采集。考虑到工业相机的视角,为保证相机能够拍摄到完整的刮板谷堆图像,经调整发现镜头与刮板距离为 45 cm 时拍摄效果最佳。测量过程中,由于刮板快速运动,曝光时间过长会导致图像模糊和产生拖影。因此,在增大进光量保证图像亮度的基础上,应当尽量缩短曝光时间。

工业相机采用硬件触发模式,当刮板经过时接近开关触发相机采集图像,这保证了每个刮板上的谷堆均能被检测到,且不受升运器转速影响。由于刮板通过金属压片和链条固定,采用电感式接近开关检测刮板位置,能够有效避免掉落的谷物或者秸秆等非金属物体误触发相机拍摄。接近开关型号为中沪电气 LM18-3020 系列,检测距离为 20 mm,响应频率为 0.5 kHz。为便于调整接近开关安装位置,固定支架设计成可调节式结构。

图像处理设备采用英特尔微型计算机,型号为 NUC7i5BNK,处理器为 i5-7260U,主频 3.4 GHz,内存 8 GB。该设备接口丰富,拥有 4 个 USB 3.0 接口和 2 个 USB 2.0 接口,能够给外接相机模块、CAN 模块以及相关器件供电。

3.2 试验装置

参考雷沃谷神 GK100 型稻麦联合收获机粮仓内粮食运送装置,搭建了室内谷物测产试验台,升运器采用刮板式结构,利用伺服电机驱动。整体组成如图 11 所示,主要包括下料斗、导料槽、伺服电机、水平螺旋输送器、升运器以及出料口等部分。

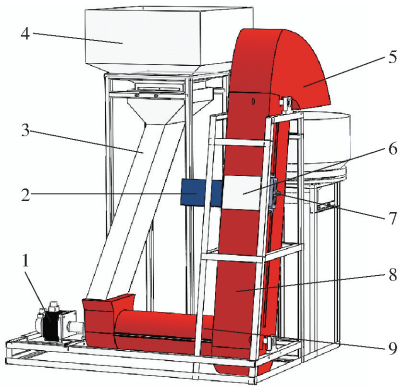


图 11 谷物测产试验台

Fig. 11 Experiment platform of grain yield monitoring

1. 伺服电机 2. 工业相机 3. 导料槽 4. 下料斗 5. 出料口 6. 辅助光源 7. 接近开关 8. 升运器 9. 水平螺旋输送器

谷物装在下料斗内,调整下料斗底板开口尺寸可以控制谷物喂入速度,谷物在重力作用下通过导料槽滑落至底部水平螺旋输送器,螺旋输送器在伺服电机的驱动下将谷物输送到升运器的底端。通过链条带动刮板将谷物从底端运送到顶部,然后从出料口排出。伺服电机下位机控制器采用 STM32 控制板,通过 PWM 波调速。上位机采用 Intel NCU 微型计算机,通过串口向下位机发送电机控制信号。在升运器中部,开有谷物流量传感器安装槽,用于安装工业相机模组、接近开关以及辅助光源。接近开

关和工业相机安装在两侧，正面视窗用于安装辅助光源。

3.3　系统标定试验

在刮板谷堆计量模型中，谷堆几何形状的理论模型与实际情况会存在差异，给测量带来误差。在运动过程中，由于机器振动，不同转速下谷堆的容重、谷物的掉落程度也会存在差异。此外，由于工业相机使用逐行曝光，拍摄运行中的物体时图像会沿运动方向拉长畸变，运动速度越快图像拉伸越严重。上述误差因素均和升运器转速有关，且属于系统误差。因此，可以通过试验标定的方法对其进行减小或消除。

由于升运器转速是影响系统误差的重要因素，开展了不同转速下的测产试验，转速范围为 100 ~ 600 r/min。同一转速下进行多次试验，将测量值和实际值对比，通过线性拟合对测量值进行修正。最终得谷物产量测量的修正模型为

$$M_d = (0.002\,5n_s + 0.63)M \tag{13}$$

式中　n_s——升运器转速，r/min

M_d——修正后的测量结果，kg

3.4　测产试验验证

为验证所提方法有效性，在室内试验台上开展了测产验证试验，试验现场如图 12 所示。试验流程为：将谷物装入下料斗，启动试验台，运行测产程序，然后逐渐打开下料斗开口，使用容器接住出料口谷物，待出口无谷物排出时，停止试验台，单次测产试验结束。需要注意的是，谷物测产系统测量的是经过升运器的谷物质量，而电子秤测量的是经出口排出的谷物，电子秤测量值相对于谷物测产系统会存在一定时间迟滞。因此，应将单次试验结束后出口谷物质量作为产量测量的标准值。



图 12　谷物测产试验现场

Fig. 12　Grain yield monitoring experiment

在实际收获过程中，为防谷物堵塞运粮通道，升运器转速通常较高，不低于 100 r/min。同时，考虑到不同喂入量的收获机升运器转速存在差异，为验证所提方法在不同工况下的测量精度，选取了 120、180、240、360 r/min 4 个不同的转速工况进行了测产试验。在每个工况下，重复进行 3 组试验。测量对象为小麦，容重约为 0.85 g/cm^3。试验结果如表 2 所示。

表 2　测产试验结果

Tab. 2　Experimental result of grain yield monitoring

序号	升运器转速/(r·min^{-1})	参考值/kg	测量值/kg	相对误差/%
1	120	36.85	36.65	-0.54
2		42.63	43.78	2.70
3		33.50	34.18	2.04
4	180	46.30	44.41	-4.08
5		46.75	46.27	-1.03
6		45.60	46.13	1.16
7	240	36.05	35.35	-1.94
8		35.90	35.12	-2.17
9		41.38	42.79	3.41
10	360	48.20	49.74	2.63
11		44.95	45.80	1.89
12		46.90	45.13	-3.77

由表 2 可知，在试验台测试中，测产系统测得的谷物质量与实际值十分接近，总体误差为 -4.08% ~ 3.41%，具有较高的测量精度，能够满足联合收获机的实际测产需求。通过标定和修正后，所提方法在不同转速工况下都能取得良好的检测效果，具有较好的适应性。

3.5　讨论

在升运器运转过程中，机身不可避免地存在振动，会对图像采集效果造成影响。这是因为，当物体和相机之间存在相对运动时，在单次曝光时间内，感光元件中特定像素视场范围内所对应的目标偏离原始位置，对其相邻像素曝光，导致图像模糊。因此，在采集图像时，缩短曝光时间能够减小振动对图像品质的影响。同时，也可采用锐化等处理方法对图像进行处理，提高图像品质。此外，振动也会使得谷物的实际容重小于静置状态下的容重，并加剧谷物从刮板四周缝隙处掉落。但由于升运器工作过程中通常保持相对恒定的转速，这类误差可以通过开展标定试验，对测量结果进行修正来消除。

4　结论

(1) 为减小传统刮板谷堆体积模型的近似误差，提高谷物产量测量精度，设计了一套基于单目视觉的谷物联合收获机测产系统。

(2) 提出了一种测量谷堆体积的图像处理方法。采用邻域微分算法提取谷堆图像区域，对谷堆区域图像利用 Otsu 法进行二值化，并使用形态学处理精确地将谷堆截面与背景分割。利用标定的相机

模型,根据图像像素面积计算出谷堆实际侧面积。通过谷堆体积模型计算得出刮板上谷堆的体积。

(3)通过对测产模型进行试验标定,减小了系统误差。利用标定后的测量模型开展的验证试验结果表明,所提方法能够准确测量谷物产量。在不同的升运器转速工况下,测量相对误差介于 -4.08% ~ 3.41%之间,能够满足联合收获机产量测量精度要求。

参 考 文 献

[1] 刘成良,林洪振,李彦明,等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 1 -18.
LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 1 -18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200101&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.001. (in Chinese)

[2] 介战,刘红俊,侯凤云. 中国精准农业联合收割机研究现状与前景展望[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 179 -182.
JIE Zhan, LIU Hongjun, HOU Fengyun. Research advances and prospects of combine on precision agriculture in China[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 179 -182. (in Chinese)

[3] CHUNG S O, CHOI M C, LEE K H, et al. Sensing technologies for grain crop yield monitoring systems: a review[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2016, 41(4): 408 -417.

[4] 金诚谦,蔡泽宇,倪有亮,等. 谷物联合收割机在线产量监测综述——测产传感方法、产量图重建和动力学模型[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(7): 137 -152.
JIN Chengqian, CAI Zeyu, NI Youliang, et al. Research review on online grain yield monitoring for combine harvester: yield sensing, yield mapping and dynamic model[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(7): 137 -152. (in Chinese)

[5] ZHOU J, CONG B, LIU C. Elimination of vibration noise from an impact-type grain mass flow sensor[J]. Precision Agriculture, 2014, 15(6): 627 -638.

[6] 魏新华,张进敏,但志敏,等. 冲量式谷物流量传感器测产信号处理方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 222 -228.
WEI Xinhua, ZHANG Jinmin, DAN Zhimin, et al. Signal processing method of impact-based grain flow sensor for predicted yield[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(15): 222 -228. (in Chinese)

[7] 熊迎军,周俊,韦玮,等. 嵌入式谷物流量传感器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 39 -46.
XIONG Yingjun, ZHOU Jun, WEI Wei, et al. Design and experiment of grain mass flow sensor based on embedded system [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 39 -46. (in Chinese)

[8] 周俊,刘成良. 平行梁冲量式谷物质量流量传感器信号处理方法[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 183 -187.
ZHOU Jun, LIU Chengliang. Signal processing method for impact-based grain mass flow sensor with parallel beam load cell [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1): 183 -187. (in Chinese)

[9] 张小超,胡小安,张爱国,等. 基于称重法的联合收获机测产方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 125 -129.
ZHANG Xiaochao, HU Xiaoan, ZHANG Aiguo, et al. Method of measuring grain-flow of combine harvester based on weighing [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 125 -129. (in Chinese)

[10] 李伟,张小超,胡小安,等. 联合收获机称量式测产系统软件设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 94 -98.
LI Wei, ZHANG Xiaochao, HU Xiaoan, et al. Design of intelligent yield monitoring software for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 94 -98. (in Chinese)

[11] ARSLAN S, INANC F, GRAY J N, et al. Grain flow measurements with X-ray techniques[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 26(1): 65 -80.

[12] RUWE D W, MURPHY G, BOCKHOP C W. Gamma-ray attenuation coefficients of grains and forages[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 9(3): 312 -313.

[13] 付兴兰, 张兆国, 安晓飞,等. 光电漫反射式联合收割机谷物产量计量系统研发与性能试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 24 -30.
FU Xinglan, ZHANG Zhaoguo, AN Xiaofei, et al. Development and performance experiment on grain yield monitoring system of combine harvester based on photoelectric diffuse reflectance[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 24 -30. (in Chinese)

[14] 安晓飞,付兴兰,孟志军,等. 光电信号与收割机谷物产量数据转换模型的构建与验证[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊 1): 36 -41.
AN Xiaofei, FU Xinglan, MENG Zhijun, et al. Grain yield data transformation model based on photoelectric principle and its validation[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 36 -41. (in Chinese)

[15] 赵湛,雷朝鹏,李洪昌,等. 基于近红外光电效应的联合收获机谷物厚度测量方法[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 381 -386.
ZHAO Zhan, LEI Chaopeng, LI Hongchang, et al. Grain thickness sensor for combine harvester grain flow measurement based on near-infrared spectroscopy[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 381 -

386. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190944&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.044. (in Chinese)

[16] 姜鑫,尹文庆,浦浩,等. 基于结构光三维视觉的螺旋输送器谷粒体积的测量方法[J]. 南京农业大学学报,2019,42(2):373-381.
JIANG Xin, YIN Wenqing, PU Hao, et al. Measurement method of grain volume on screw conveyor based on structured light of 3D vision[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2019,42(2): 373-381. (in Chinese)

[17] ZHAO S, ZHENG H, CHI M, et al. Rapid yield prediction in paddy fields based on 2D image modelling of rice panicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2019,162:759-766.

[18] 尹文庆,浦浩,胡飞,等. 基于结构光视觉的谷粒体积流量测量方法[J/OL]. 农业机械学报,2020, 51(9):101-107.
YIN Wenqing, PU Hao, HU Fei, et al. Measurement method of grain volume flow based on structured light[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(9):101-107. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1& file_no=20200912&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.012. (in Chinese)

[19] 杨刚,雷军波,刘成良,等. 基于线结构光源和机器视觉的高精度谷物测产系统研制[J]. 农业工程学报,2019,35(8):21-28.
YANG Gang, LEI Junbo, LIU Chengliang, et al. Development of yield monitoring system with high-precision based on linear structured light source and machine vision[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(8):21-28. (in Chinese)

[20] 罗启峰. 基于机器视觉的零件三维尺寸全方位测量技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
LUO Qifeng. Research on 3D dimensional omnidirectional measurement technology based on machine vision[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2019. (in Chinese)

[21] 张旭苹,汪家其,张益昕,等. 大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现[J]. 光学学报,2012,32(3):148-155.
ZHANG Xuping, WANG Jiaqi, ZHANG Yixin, et al. Large-scale three-dimensional stereo vision geometric measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 148-155. (in Chinese)

[22] SZELISK R. 计算机视觉:算法与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2012.

[23] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2002, 22(11): 1330-1334.

[24] 赵腾. 基于激光扫描的联合收割机自动导航方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
ZHAO Teng. Development of automatic navigation method for combine harvester based on laser scanner[D]. Yangling: Northwest A&F University,2017. (in Chinese)

(上接第 224 页)

[23] 潘竟虎,冯娅娅. 中国农村深度贫困的空间扫描与贫困分异机制的地理探测[J]. 地理学报,2020,75(4): 769-788.
PAN Jinghu, FENG Yaya. Spatial distribution of extreme poverty and mechanism of poverty differentiation in rural China based on spatial scan statistics and geographical detector[J]. Acta Geographica Sinica,2020,75(4): 769-788. (in Chinese)

[24] 吴家荣,韦宝婧,胡希军,等. 基于地理探测器的丹霞梧桐空间分布与生境因子相关性[J]. 应用生态学报. 2020,31(8):2671-2679.
WU Jiarong, WEI Baojing, HU Xijun, et al. Correlation of spatial distribution and habitat factors of *Firmiana danxiaensis* based on GeoDetector[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2020,31(8):2671-2679. (in Chinese)

[25] 中国国家标准化管理委员会. 农用地定级规程:GB/T 28405—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.

[26] 董光龙,赵轩,刘金花,等. 基于耕地质量评价与空间集聚特征的基本农田划定研究[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(2):133-142.
DONG Guanglong, ZHAO Xuan, LIU Jinhua, et al. Prime cropland assignment based on cultivated land quality evaluation and spatial cluster pattern[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(2):133-142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2002015&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.015. (in Chinese)

[27] 杨建宇,杜贞容,杜振博,等. 基于耕地质量评价和局部空间自相关的高标准农田划定[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(6):109-115.
YANG Jianyu, DU Zhenrong, DU Zhenbo, et al. Well facilitied capital farmland assignment based on land quality evaluation and LISA[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(6):109-115. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170614&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.014. (in Chinese)

[28] 李武艳,朱从谋,王华,等. 浙江省耕地质量多尺度空间自相关分析[J]. 农业工程学报,2016,32(23):239-245.
LI Wuyan, ZHU Congmou, WANG Hua, et al. Multi-scale spatial autocorrelation analysis of cultivated land quality in Zhejiang Province[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(23):239-245. (in Chinese)

[29] ESRI. ArcGIS 帮助 10.1. 分组分析的工作原理[EB/OL]. http://resources.arcgis.com/zh-cn/help/main/10.1/index.html#/na/005p0000004w000000/.