

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.012

基于结构光视觉的联合收获机谷粒体积流量测量方法

尹文庆 浦浩 胡飞 钱燕 郭栋 武亚楠

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 针对谷物联合收获机工作过程中需要实时测量谷粒流量的问题, 提出应用结构光视觉测量技术实现谷物联合收获机测量系统谷粒体积分流量的测量。采用普通滑槽作为测量谷粒体积分流量的输送机, 应用滚轮与编码器测量谷粒在滑槽中的流动速度。根据激光三角法测量原理构建结构光三维视觉系统, 测量滑槽中流动谷粒的截面轮廓, 应用试验参数标定法建立物长与像素偏移值的关系。在对结构光图像进行预处理的基础上, 通过阈值判定法获取谷粒流截面轮廓; 采用梯形微元求和法分别建立谷粒流截面计算模型与体积分计算模型。试验研究了滑槽倾角和图像采集帧率对谷粒体积分流量测量误差的影响, 结果表明, 当滑槽倾角在 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 、结构光图像采集帧率在 $40 \sim 100$ f/s 时, 4 种谷粒体积分流量的测量误差小于等于 5.2%, 重复试验变异系数小于等于 0.021, 均方根误差小于等于 1.268 L; 当测量体积分 17.6 L、滑槽倾角为 30° 、结构光图像采集帧率为 100 f/s 时, 测量误差最小, 为 0.74%; 当测量体积分 39.2 L、滑槽倾角为 20° 、结构光图像采集帧率为 40 f/s 时, 测量误差最大, 为 5.2%。采用结构光三维视觉测量系统, 应用梯形微元积分求和法建立谷粒流体积分计算模型, 可以实现滑槽输送谷粒体积分的在线测量。

关键词: 谷物联合收获机; 测产系统; 谷粒体积分流量; 滑槽; 结构光三维视觉系统

中图分类号: TP391.41; S333.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)09-0101-07

OSID:



Measurement Method of Grain Volume Flow Based on Structured Light

YIN Wenqing PU Hao HU Fei QIAN Yan GUO Dong WU Ya'nan

(College of Engineering, Nanjiang Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: Drawing the grain yield map during the operation of the combine harvester is a requirement to achieve precision agriculture. To draw the yield map, the grain flow into the grain tank must be measured in real time during the combined harvest. Applying the structured light visual measurement technology to achieve the measurement of grain volume flow was proposed. Ordinary chute was used as the conveyor to measure the volume flow of the grain. Rollers and encoders were used to measure the flow velocity of the grain in the chute. A structured light three-dimensional vision system was constructed based on the principle of laser triangulation to measure the flow valley in the chute cross-section profile of grain. The relationship between the object length and the pixel offset value was established by the test parameter calibration method. Based on the pre-processing of the structured light image, the cross-sectional profile of the grain flow was obtained by the threshold determination method. The trapezoidal micro-element summation method was used to establish the grain flow section calculation model and the volume calculation model. The effects of the chute inclination angle and image acquisition frame rate on the measurement error of grain volume flow were experimentally studied. The experimental results showed that when the chute inclination angle was from 15° to 30° and the frame light acquisition frame rate was from 40 f/s to 100 f/s, the measurement error of volume flow of the four kinds of grain was no more than 5.2%, the coefficient of variation of repeated experiments was no more than 0.021, and the root mean square error was no more than 1.268 L. When the measurement volume was 17.6 L, the chute inclination angle was 30° , and the structured light image acquisition frame rate was 100 f/s, the minimum measurement error was 0.74%. When the measurement volume was 39.2 L, the inclination of the chute was 20° , and the frame rate of the structured light image was 40 f/s, the maximum measurement error

收稿日期: 2019-12-27 修回日期: 2020-01-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700800)

作者简介: 尹文庆(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事种植收获机械设计理论及监控技术研究,E-mail: yinwq@njau.edu.cn

通信作者: 钱燕(1979—),女,副教授,主要从事农业机器人及三维视觉技术研究,E-mail: qianyan@njau.edu.cn

was 5.2%. A structured light three-dimensional visual measurement system and a trapezoidal micro-element integral summation method were used to establish a grain flow volume calculation model, which can realize the online measurement of the grain volume conveyed by the chute.

Key words: grain combine harvester; production measurement system; grain volume flow; chute; structured light three-dimensional vision system

0 引言

精准农业通过制定科学的管理决策、实施生产过程的定位和定量精细调控投入,提高农业生产力、减少环境污染,实现农业可持续发展,因此推动精准农业发展具有重要意义^[1]。谷物测产系统是实现精准农业的关键技术之一,通过获取作物的产量信息,建立小区产量分布图是精准农业技术体系中的重要环节之一^[2]。

目前,在谷物联合收获机上安装测产系统是获取产量信息的有效途径,其核心是谷粒流量测量系统。谷物测产系统的核心部件谷物流量传感器可分为基于质量流和基于体积流两种类型。欧美主流测产系统技术成熟,并已经商业化发展^[3-5],如美国 Case IH 公司的 AFS 系统、John Deere 公司的 Green Star 系统、Ag Leader 公司的 PF advantage 系统等。基于质量流检测的谷物流量传感器有冲量式、称重式以及 γ 射线等,冲量式应用最为广泛^[6]。胡均万等^[7]基于冲量原理设计了双板差分冲量式谷物流量传感器,通过差分消振电路,提高了传感器抗振动干扰的能力,田间实际测量误差小于 5%。周俊等^[8]采用平行梁冲量传感器,通过增加敏感元件结构阻尼、传感器输出信号动态补偿以及谐振干扰滤波等方法克服环境引起的测量误差,田间测产误差约为 10%。张小超等^[9]基于称重原理研发了粮食产量流量测量系统及产量分部信息软件,台架试验误差小于 2%。 γ 射线测量精度较高,但由于其放射性以及成本高昂等因素制约了其发展。基于体积流检测的谷物流量传感器主要有对射式、漫反射式、结构光等。随着计算机技术和图像处理技术的发展,采用光电传感器测产成为研究的热点。赵湛等^[10]采用对射式光电传感器测量谷物厚度,建立光电信号与收获机谷物产量数据转换模型,测量相对误差小于 6.5%。付兴兰等^[11]采用漫反射式光电传感器测算脉宽信号,编码器实时测量升运器转速,建立分段式谷物产量转换模型,设计了光电漫反射谷物流量测量系统,田间测产误差约为 3.5%。杨刚等^[12]基于线结构光源和机器视觉设计了谷物测产系统,采用电感式接近开关解决了系统误触问题,建立转速的线结构修正模型以减小误差,台架实验误

差小于 4.27%。综上,双板冲量式谷物流量传感器通过差分运算减小振动对测量精度的影响,但不同机器的差异性难以建立准确统一的修正模型。基于体积流的检测大多基于升运器,使用成本较高,且机器振动影响较大,对试验结果有一定影响。

目前,物体表面轮廓检测和重建技术已不断成熟,结构光三维视觉是近年发展起来的光学测量方法,适于测量不规则物体表面^[13]。本研究采用滑槽输送谷物,利用滑槽运输量大、结构简单等特点,基于激光三角法原理建立结构光三维视觉系统,利用编码器获得谷粒流速度,设计滑槽输送谷粒体积流量测量系统,以实现滑槽输送谷粒体积流量的测量。

1 系统总体结构与工作过程

谷粒体积流量测量系统总体结构见图 1,由激光器、工业相机、滑槽、测速模块以及谷粒体积计算模块组成。滑槽作为输送谷物的平台,截面宽、高分分别为 200、100 mm,滑槽的倾角可调节,倾角调节范围为 $15^\circ \sim 45^\circ$,为了实现谷粒在滑槽中平稳流动,在滑槽上部装有挡板。根据滑槽尺寸及实际安装需求,选用 FU650AB100-GD16 型一字线激光器,激光波长为 650 nm,激光器安装于滑槽正上方并与滑槽垂直,选用大恒 MER-131-210U3M 型黑白相机(分辨率为 1 280 像素 \times 1 024 像素,帧率为 210 f/s 可调,图像格式为 bmp),通过 USB 3.0 接口将采集的图像传输给谷粒体积计算模块。根据视场范围,选用 M0814-MP2 型相机镜头,焦距为 8 mm,工业相机物距大于 320 mm。系统拍摄视场为 200 mm \times 160 mm。测速模块由编码器、驱动滚轮和计数器组成,光电旋转编码器型号为乐全 HS15H60G-1258BH-N2,圆周分辨率为 1 258 p/r。

系统开始工作时,谷粒物料顺着滑槽向下运动至结构光平面处,激光发射器发出的线结构光照射在谷粒流表面,工业相机实时采集滑槽输送的谷粒流结构光轮廓的变化图像。结构光轮廓实时变化,反映了谷粒流截面积的变化,结构光轮廓曲线与滑槽结构光曲线围成的截面即为谷粒流的截面积。测速模块中的驱动滚轮随着谷粒流动而转动,光电编码器输出滚轮转速脉冲信号即可测量出实时的谷粒流速。根据获得的谷粒流的截面积及对应的谷粒流速,即可计算出

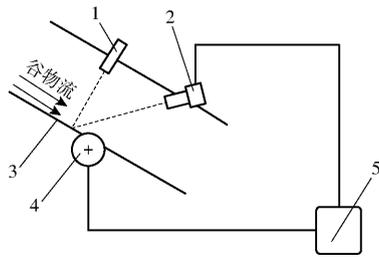


图1 测量系统结构图

Fig.1 Measurement system structure diagram

1. 激光器 2. 工业相机 3. 滑槽 4. 测速模块 5. 谷粒体积计算模块

该时刻的谷粒流体积,实时累加后获得输送的谷粒物料的体积。测量系统流程如图2所示。

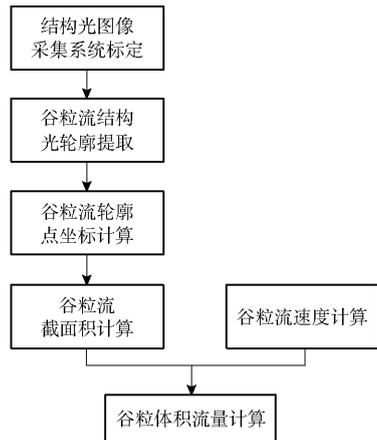


图2 测量系统流程图

Fig.2 Measurement system flow chart

2 谷粒体积流量算法

2.1 参数标定

采用试验参数标定法对系统参数进行标定,标定光路图如图3所示。

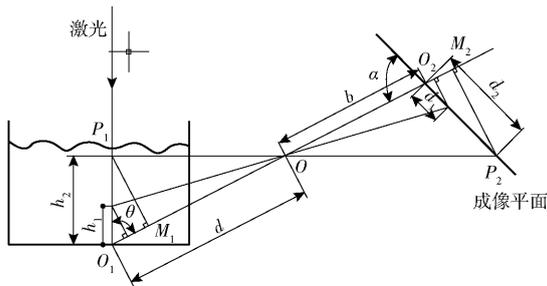


图3 标定光路图

Fig.3 Calibration light path diagram

线激光照射在物体表面,反射光线通过透镜中心 O 在成像平面上成像, OO_1 为成像物距, OO_2 为成像像距, θ 为入射光线与最低点的反射光线夹角, α 为最低点反射光线与成像平面夹角。当物长为 h_2 时,对应成像平面像素偏移值为 d_1 ; 当物长为 h_1 时,对应的成像平面像素偏移值为 d_2 , 因为相机安装于滑槽上方固定位置,即 d, b, θ, α 为固定值,物长与像

素偏移值具有一一对应的关系^[14]。为了得到物长与像素偏移值的关系,在试验台上安装一部辅助激光发射器,它与测量激光线形成十字激光,同时在测量激光平面上安装激光测距仪,如图4所示。



(a) 线激光交叉

(b) 标定设备安装

图4 试验标定设备安装图

Fig.4 Installation drawing of test calibration equipment

在测量激光线安装架上选取4个辅助激光器的安装位置,每个安装位置向滑槽填充谷粒20次,如图4a所示,每次填充谷粒后读取激光测距仪的数据及CCD相机拍摄的图像对应点的像素偏移值,每个测点重复测量10次取平均值。利用曲线拟合法对4个安装位置采集的标定数据进行最小二乘法拟合,标定关系曲线如图5所示。平均相对误差为0.93%。

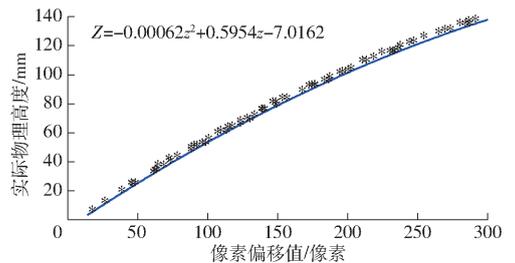


图5 标定关系曲线

Fig.5 Calibration relationship curve

2.2 结构光图像预处理

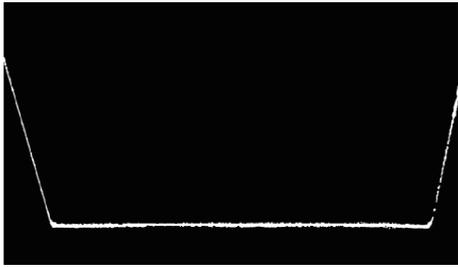
为了获取滑槽输送的谷粒流表面线激光轮廓的边界点,提取感兴趣区域(RoI)图像,确定RoI尺寸为1280像素×600像素,空载状态下激光照射位置滑槽轮廓如图6a所示,用极值法对图像轮廓坐标进行提取,由于相机拍摄视场相对于滑槽位置不变,根据滑槽结构光轮廓特点,分3段进行最小二乘法曲线拟合^[15],如图6b所示,滑槽轮廓的表达式为

$$z = \begin{cases} 474.5 - 2.836y & (y \in [0, 135]) \\ 91 & (y \in (135, 1201]) \\ -4788.7 + 4.06y & (y \in (1201, 1280]) \end{cases} \quad (1)$$

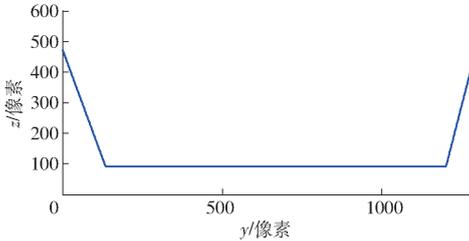
式中 z —— z 轴方向像素偏移值

y —— y 轴方向像素偏移值

为了消除采集过程中环境光对结构光图像的干扰,采用5×5模板的中值滤波算子进行滤波处理,



(a) 滑槽轮廓



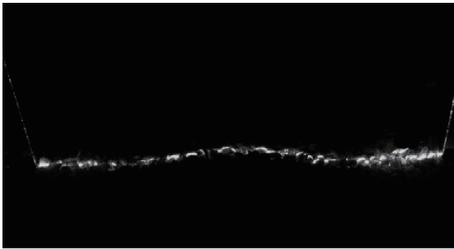
(b) 滑槽轮廓拟合曲线

图6 滑槽轮廓

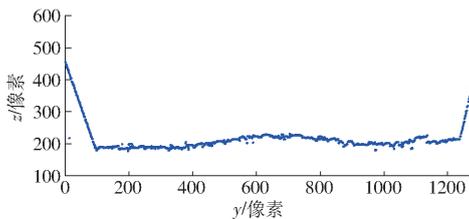
Fig.6 Trough profile

如图7a所示;对结构光图像采用极值法进行边界检测与提取^[16],如图7b所示。图中横坐标为y轴方向像素偏移值,纵坐标为z轴方向像素偏移值。通过阈值判定法提取谷粒结构光轮廓 Z_c ,将提取的结构光轮廓减去空载时滑槽轮廓,得到判定值 ΔZ 。

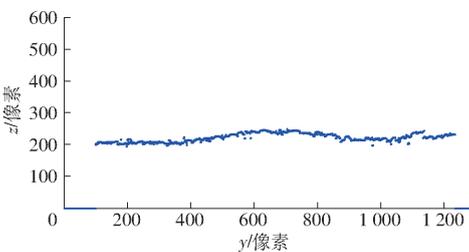
$$\Delta Z = \begin{cases} Z_c - 474.5 + 2.836y & (y \in [0, 135]) \\ Z_c - 91 & (y \in (135, 1201]) \\ Z_c + 4788.7 - 4.06y & (y \in (1201, 1280]) \end{cases} \quad (2)$$



(a) 结构光中值滤波图像



(b) 结构光轮廓曲线采集图像



(c) 结构光谷粒流轮廓曲线

图7 谷粒流结构光轮廓提取方法

Fig.7 Grain flow structured light contour extraction method

通过试验验证选取阈值 $T_c = 5$,当 $\Delta Z \geq T_c$ 时,判定为谷粒流轮廓点;当 $\Delta Z < T_c$ 时,判定为料槽轮廓点, Z_c 置0。提取谷粒流轮廓,结果如图7c所示。

2.3 谷粒流截面积计算

通过标定结果,将谷粒流轮廓边界坐标转换为对应的谷粒流实际物理值。如图8a所示, k 为当前时刻拍摄获取的物料截面帧数,因相机在y方向(谷粒流截面方向)上分辨率大于1000像素,可将相邻两点间连线近似看作线性变化^[17],则在第 k 帧时,第 i 个梯形微元面积为

$$\Delta S(i, k) = (Z_{ik} - Z'_{ik} + Z_{(i+1)k} - Z'_{(i+1)k}) \Delta y / 2 \quad (3)$$

(i = 1, 2, \dots, x; k = 1, 2, \dots)

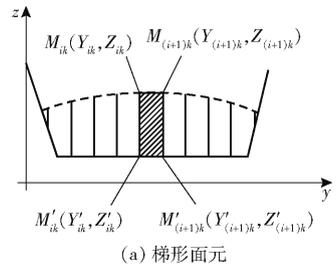
式中 x ——每帧谷粒流截面边界特征点数

Δy ——y轴方向相邻梯形微元的中心点距离,由数字图像处理可得

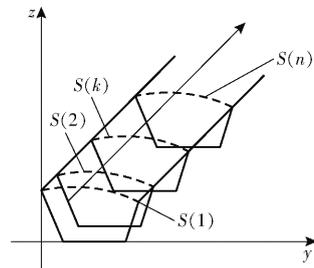
则在 t 时刻,谷粒流瞬时截面积为

$$S(t) = S(t, k) = \sum_{i=1}^m \Delta S(i, k) \quad (4)$$

式中 m ——y轴方向上梯形微元总数



(a) 梯形面元



(b) 谷粒流截面

图8 谷粒流体积计算模型

Fig.8 Grain flow volume calculation model

2.4 谷粒流速度计算

为了获取谷粒流的流速,在滑槽的中央装一个半径为40mm的滚轮,当谷粒经过激光扫描区域后带动滚轮旋转,采用光电旋转编码器测量滚轮的转速,通过电子计数器通讯功能将数据传输至计算机。谷粒流速测量结构图如图9所示。

为了在较宽速度范围内实现高精度测速,使用M/T测速法,即在预定时间内同时对编码器输出脉冲与时钟脉冲计数^[18],其测速原理如图10所示。

所测得的转速为

$$n(t) = \frac{f_s m_1}{N m_2} \quad (5)$$

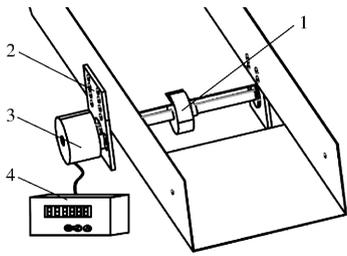


图9 谷粒流速测量结构图

Fig.9 Grain flow measurement structure

1. 滚轮 2. 安装板 3. 编码器 4. 电子计数器

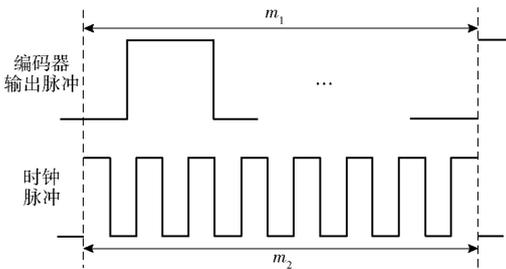


图10 M/T法测速原理图

Fig.10 Principle of M/T method for speed measurement

式中 m_1 ——编码器输出脉冲数

m_2 ——时钟脉冲数

f_s ——时钟脉冲频率

N ——编码器旋转一周所输出的脉冲数

$n(t)$ ——编码器的转速

则谷粒流速为

$$v(t) = 2\pi rn(t) \quad (6)$$

式中 r ——旋转半径

$v(t)$ ——谷粒流速度,由运动控制器测出

2.5 谷粒流体积计算

设谷粒流以速度 $v(t)$ 沿滑槽运动,则 $S(1)$ 、 $S(2)$ 、 \dots 、 $S(n)$ 为第 1、2、 \dots 、 n 帧线激光谷粒流轮廓截面面积,如图 8b 所示^[19]。

设 t 时刻,谷粒流瞬时截面积为 $S(t)$,则瞬时体积 $p(t)$ 为

$$p(t) = \frac{1}{f} S(t) v(t) \quad (7)$$

式中 f ——图像采集帧率

则在 t 时间内,根据公式 $n = tf$ 计算得出截面积数 n 。那么 t 时间内谷粒体积 $P(t)$ 为

$$P(t) = \frac{1}{f} S(1) v(t_1) + \frac{1}{f} S(2) v(t_2) + \dots + \frac{1}{f} S(n) v(t_n) = \frac{1}{f} \sum_{i=1}^n S(i) v(t_i) \quad (8)$$

3 试验结果与分析

为了获得不同物料体积、相机的图像采集帧率以及滑槽倾角对测量误差的影响,选用的试验体积有 17.6、24.8、32.0、39.2 L 共 4 种早灿 307 水稻,滑槽倾角为 15°、20°、25°、30°,图像采集帧率为 40、60、80、100 f/s。每个试验重复 4 次^[20],试验因素水平见表 1,试验结果见表 2。采用正交试验法,选用 $L_{16}(4^3)$ 正交试验表安排试验。

表 1 试验因素水平

Tab.1 Factor levels of experimental design

水平	试验因素		
	谷粒体积 A/L	滑槽倾角 $B/(\circ)$	图像采集帧率 $C/(f \cdot s^{-1})$
1	17.6	15	40
2	24.8	20	60
3	32.0	25	80
4	39.2	30	100

由表 2 可知,在滑槽倾角为 30°、谷粒体积为 17.6 L、相机的图像采集帧率为 100 f/s 时,最小测量误差为 0.74%,在滑槽倾角为 20°、谷粒体积为 39.2 L、相机的图像采集帧率为 40 f/s 时,最大测量误差为 5.2%。通过对表 2 极差分析可得^[21]:各因素对谷粒体积测量误差的影响由大到小依次为 R_A 、 R_C 、 R_B ,所以谷粒体积对测量误差的影响最大。在谷粒体积一定时,相机的图像采集帧率对测量误差影响较大,达到显著水平,滑槽倾角的影响相对较弱。如图 11 所示,滑槽倾角对谷粒体积测量误差的影响呈正相关,相机的图像采集帧率对谷粒体积测量误差的影响呈负相关。

4 结论

(1) 构建了基于结构光三维视觉的滑槽输送谷粒体积流量的测量系统。该系统主要由激光器和工业相机组成,可以实时获取滑槽谷粒流表面的结构光图像。

(2) 通过对结构光图像进行预处理和采用阈值判定法可以获得谷粒流截面的包围轮廓,采用梯形微元法分别建立了滑槽中谷粒流的截面积计算模型和体积计算模型。

(3) 进行了正交试验,研究滑槽倾角和图像采集帧率对谷粒体积流量误差的影响。在 4 种谷粒体

表2 正交试验结果

Tab.2 Results of orthogonal experiment

试验 编号	因素			谷粒流平均速 度/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	测量体积/L			测量误差/%			变异 系数	均方根 误差/L
	A/L	B/($^{\circ}$)	C/($\text{f}\cdot\text{s}^{-1}$)		1	2	3	1	2	3		
1	17.6	15	40	43.8	17.35	18.03	17.95	1.42	2.44	1.99	0.015	0.351
2	17.6	20	60	48.6	18.02	17.81	17.29	2.39	1.19	1.76	0.015	0.325
3	17.6	25	80	57.6	17.40	17.87	17.99	1.14	1.53	2.22	0.012	0.297
4	17.6	30	100	65.2	17.98	17.73	17.86	2.16	0.74	1.48	0.005	0.276
5	24.8	15	60	43.1	25.25	24.31	25.32	1.81	1.98	2.10	0.016	0.486
6	24.8	20	80	48.3	25.15	25.19	24.19	1.41	1.57	2.46	0.016	0.464
7	24.8	25	100	58.1	25.33	24.50	24.36	2.14	1.21	1.77	0.015	0.434
8	24.8	30	40	65.6	24.42	25.45	25.51	1.53	2.62	2.86	0.017	0.597
9	32.0	15	80	44.3	32.88	32.30	31.16	2.75	0.94	2.63	0.019	0.723
10	32.0	20	100	48.7	31.32	32.54	32.85	2.13	1.69	2.66	0.018	0.702
11	32.0	25	40	57.7	32.79	32.62	33.16	2.47	1.94	3.63	0.006	0.886
12	32.0	30	60	65.7	31.54	32.92	33.02	1.44	2.86	3.19	0.018	0.835
13	39.2	15	100	43.7	39.59	40.03	38.25	0.99	2.12	2.42	0.017	0.869
14	39.2	20	40	48.5	41.24	39.65	39.88	5.20	1.15	1.74	0.019	1.268
15	39.2	25	60	58.0	38.43	40.59	40.23	1.96	3.55	2.63	0.021	1.093
16	39.2	30	80	65.8	38.40	40.03	40.46	2.04	2.12	3.21	0.019	0.986
k_1	1.71	1.97	2.42									
k_2	1.96	2.11	2.24									
k_3	2.36	2.18	2.00									
k_4	2.43	2.19	1.79									
R	0.72	0.22	0.63									

注： k_i 表示试验*i*因素水平下任意列对应的测量平均误差；R表示极差，是 k_i 中最大值与最小值的差，代表此试验因素对测量误差的影响。

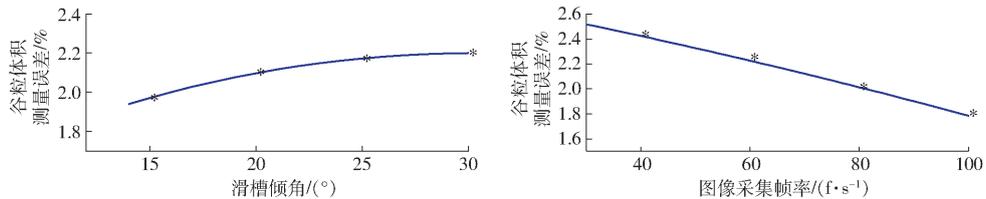


图11 不同因素水平下谷粒体积测量误差的变化曲线

Fig.11 Variation of grain volume measurement error at different factor levels

积流量的测量中,当测量体积为 17.6 L、滑槽倾角为 30°、结构光图像采集帧率为 100 f/s 时,测量误差最小,为 0.74%;当测量体积为 39.2 L、滑槽倾角为

20°、结构光图像采集帧率为 40 f/s 时,测量误差最大,为 5.2%。系统测量误差不大于 5.2%,重复试验变异系数不大于 0.021,均方根误差不大于 1.268 L。

参 考 文 献

- [1] 张垒,时恩早. 精准农业中大数据的应用[J]. 计算机产品与流通,2019(10):166. ZHANG Lei, SHI Enzo. Application of big data in precision agriculture[J]. Computer Products and Distribution, 2019(10): 166. (in Chinese)
- [2] 王风华,张淑娟. 精细农业田间信息采集关键技术的研究进展[J]. 农业机械学报,2008,39(5):112-121,111. WANG Fenghua, ZHANG Shujuan. Research progress of the farming information collections key technologies on precision agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 112-121, 111. (in Chinese)
- [3] REINKE R, DANKOWICZ H, PHELAN J, et al. A dynamic grain flow model for a mass flow yield sensor on a combine[J]. Precision Agriculture, 2011, 12(5): 732-749.
- [4] 安晓飞,孟志军,武广伟,等. 基于 CAN 总线的谷物产量快速计量系统研发[J]. 农业工程学报,2015,31(增刊2):262-266. AN Xiaofei, MENG Zhijun, WU Guangwei, et al. Development of grain yield monitoring system based on CAN bus technology [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.2): 262-266. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] 马朝兴,李耀明,徐立章. 联合收割机谷物流量传感器的现状与分析[J]. 农机化研究,2008,30(7):74-76.

- MA Chaoxing, LI Yaoming, XU Lizhang. Present status and analysis of grain flow sensor of combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(7): 74 - 76. (in Chinese)
- [7] 胡均万, 罗锡文, 阮欢, 等. 双板差分冲量式谷物流量传感器设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 69 - 72.
HU Junwan, LUO Xiwen, RUAN Huan, et al. Design of a dual-plate differential impact-based yield sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 69 - 72. (in Chinese)
- [8] 周俊, 周国祥, 苗玉彬, 等. 悬臂梁冲量式谷物质量流量传感器阻尼设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 127 - 129, 133.
ZHOU Jun, ZHOU Guoxiang, MIAO Yubin, et al. Damping design of impact-based grain yield sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 127 - 129, 133. (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 Xiaohan, 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] 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)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 罗胜彬, 宋春华, 韦兴平, 等. 非接触测量技术发展研究综述[J]. 机床与液压, 2013, 41(23): 150 - 153.
LUO Shengbin, SONG Chunhua, WEI Xingping, et al. Review for the development and research of non-contact measurement technology[J]. Machine Tools and Hydraulics, 2013, 41(23): 150 - 153. (in Chinese)
- [14] 曹鹏, 尹文庆, 吴林华, 等. 基于激光传感器的稻种轮廓形状测量方法研究[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(3): 1 - 4.
CAO Peng, YIN Wenqing, WU Linhua, et al. Study of outline shape measurement method of rice seed based on laser sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(3): 1 - 4. (in Chinese)
- [15] 赵延超, 武美萍, 任仲贺, 等. 线结构光视觉技术与最小二乘法中孔直线度检测[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(1): 141 - 144.
ZHAO Yanchao, WU Meiping, REN Zhonghe, et al. Research on line structured light vision technology and the least squares method for detection of straightness of injector body[J]. Mechanical Design and Research, 2018, 34(1): 141 - 144. (in Chinese)
- [16] 南方, 李大华, 高强, 等. 改进 Steger 算法的自适应光条纹中心提取[J]. 激光杂志, 2018, 39(1): 85 - 88.
NAN Fang, LI Dahua, GAO Qiang, et al. Implementation of adaptive light stripe center extraction of improved Steger algorithm [J]. Laser Journal, 2018, 39(1): 85 - 88. (in Chinese)
- [17] 宋冠霆, 宋伟刚. 带式输送机物料截面面积计算方法的评述与确定[J]. 煤炭学报, 2017, 42(增刊2): 556 - 561.
SONG Guanting, SONG Weigang. Determination and review on calculation method of cross-sectional area of carrying material at belt conveyor[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(Supp. 2): 556 - 561. (in Chinese)
- [18] 贾兴丹, 万秋华, 赵长海, 等. 光电编码器测速方法现状与展望[J]. 仪表技术与传感器, 2018, 55(3): 102 - 107.
JIA Xingdan, WAN Qiu-hua, ZHAO Changhai, et al. Status and prospect of velocity measurement method with optical encoder [J]. Instrument Technology and Sensors, 2018, 55(3): 102 - 107. (in Chinese)
- [19] 王志强, 刘彩霞. 积分微元法及其应用研究[J]. 湖北第二师范学院学报, 2009, 26(8): 9 - 10.
WANG Zhiqiang, LIU Caixia. Research on integral differential method and its application[J]. Journal of Hubei Second Normal University, 2009, 26(8): 9 - 10. (in Chinese)
- [20] 曾飞, 吴青, 初秀民, 等. 带式输送机物料瞬时流量激光测量方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(2): 40 - 47.
ZENG Fei, WU Qing, CHU Xiumin, et al. Measurement of material instantaneous flow on belt conveyors based on laser scanning [J]. Journal of Hunan University(Natural Science), 2015, 42(2): 40 - 47. (in Chinese)
- [21] 蔡力钢, 刘海东, 程强, 等. 基于正交试验法的模锻模具磨损分析及优化[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(1): 1 - 9.
CAI Ligang, LIU Haidong, CHENG Qiang, et al. Analysis and optimization of die forging wear based on orthogonal test method [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(1): 1 - 9. (in Chinese)