

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.002

玉米籽粒考种信息获取装置设计与试验

宋鹏^{1,2} 张晗^{1,3} 王成^{1,2} 罗斌^{1,2} 赵勇^{1,2} 潘大宇^{1,3}(1.北京农业智能装备技术研究中心,北京 100097; 2.国家农业智能装备工程技术研究中心,北京 100097;
3.农业部农业信息技术重点实验室,北京 100097)

摘要: 考种是制约育种效率的关键环节。玉米高通量考种过程,存在籽粒堆积和粘连现象,影响籽粒考种参数的提取。本文结合玉米高通量自动考种需求,设计了籽粒考种信息获取装置。通过分析堆积籽粒回旋运动过程的受力情况并根据试验情况确定振动平台回旋速度,实现籽粒的平铺摊种。在此基础上,针对粘连籽粒图像提出了一种先分割后融合的改进分水岭算法,该方法通过比较相邻分割区域极小值与最小分水岭的差值与设定的阈值 T ,进行邻域融合,对过分割区域进行合并,实现粘连籽粒的准确分割,分割完成后,统计籽粒个数,并基于 Graham 扫描法建立单个籽粒的最小外接矩形,获取籽粒长宽参数。在构建的玉米籽粒自动考种装置上进行动态试验,结果表明,本文所提出的方法可实现玉米粘连籽粒的准确分割,单穗玉米籽粒计数正确率不低于 98.05%,籽粒平均长宽与人工测量结果的决定系数 R^2 在 0.97 以上,满足自动考种在线检测的需求。

关键词: 玉米籽粒; 自动考种; 机器视觉; 粘连分割; 回旋振动

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)12-0019-07

Design and Experiment of Maize Kernel Traits Acquisition Device

SONG Peng^{1,2} ZHANG Han^{1,3} WANG Cheng^{1,2} LUO Bin^{1,2} ZHAO Yong^{1,2} PAN Dayu^{1,3}

(1. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

2. National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

3. Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: In the process of automatic maize kernel trait extraction, the parameters of maize kernel can be obtained by machine vision. In the process of machine vision analysis, the accumulation of maize grain affects the extraction of kernel parameters. A method of obtaining information of corn kernel and cyclotron vibration platform was designed. Through the analysis of the stress distribution of accumulation seed cyclotron motion process, the vibration platform swing speed was determined, and the grain accumulation was reduced. Through the vibration kernel accumulation was reduced first, and then maize kernel image was obtained. In the image processing and analysis stage, image of maize kernels was segmented. To solve the segmentation problem of maize kernels, an improved watershed algorithm was proposed. After watershed segmentation, the D-value between the minimum watershed value and the minimum value of the pixel points between adjacent segmentation region were calculated, and then the D-value was compared with T . If the D-value was less than T , the adjacent segmentation region was merged. Segmentation made each maize kernel be a region. The number of maize grains corresponded to the number of regions. After the segmentation was completed, minimum external rectangle of single seed was established by improved Graham scanning method. The length and width of the minimum external rectangle corresponded to the length and width of the kernel. Verification experiments were carried out on the corn seed metering device. The final test results showed that the correct rate of segmentation method proposed on maize grain reached above 98.05% and the determination correlation coefficient between algorithm and manual measured values was above 0.97. The system can realize rapid acquisition of relevant information of maize kernel, and achieve the expected performance index as well as meet practical demands.

Key words: maize kernel; automatic seeds test; machine vision; adhesion segmentation; cyclotron vibration

收稿日期: 2017-03-17 修回日期: 2017-05-15

基金项目: 北京市科技计划项目(D151100004215002)和国家博士后基金项目(2015M581019)

作者简介: 宋鹏(1986—),男,高级工程师,博士,主要从事农业信息技术及装备研究,E-mail: songp@nercita.org.cn

通信作者: 王成(1970—),男,研究员,博士,主要从事农业信息化、农业智能装备及仪器研究,E-mail: wangc@nercita.org.cn

引言

考种是育种的重要环节,考种效率和精度直接制约着品种的选育效率^[1],玉米考种涉及果穗和籽粒多种性状参数的采集和储存,视觉技术的应用可提高玉米考种效率^[2-6]。随着商业化育种的发展,对能实现玉米果穗及籽粒高通量考种的装备提出了新需求。玉米高通量自动考种过程,脱粒后的籽粒存在堆积和粘连情况,如何实现该条件下籽粒的准确分割是玉米籽粒考种信息准确获取的关键所在。目前在粘连籽粒图像分割方面,主要通过腐蚀膨胀结合法^[7-8]、分水岭分割法^[9-13]、特征匹配法^[14-15]、轮廓凹点检测法^[16-18]和主动轮廓拟合法^[19]等;在堆积籽粒处理方面,多采用排种和喂料机构配合传输带实现籽粒逐个检测^[20-21]以避免籽粒堆积。

本文设计籽粒考种信息获取装置,通过回旋振动消除籽粒堆积状况并获取图像,使用改进分水岭分割方法进行粘连分割并实现玉米籽粒数量、平均长宽等参数的快速测量,满足动态考种需求。

1 籽粒考种信息获取装置设计

1.1 系统组成

籽粒考种信息获取装置如图1所示,由图像采集装置、光源、卸料装置和振动平台组成。图像采集装置的摄像头选用中国大恒(集团)有限公司自主研发的DH-HV5051型系列彩色CMOS数码相机,其感光芯片尺寸1/2.5英寸,图像分辨率500万像素,选用日本Computar公司生产的5mm焦距镜头配合进行图像采集。摄像头安装距离60cm,此时成像范围为64cm×48cm,可完全覆盖待检测玉米籽粒区域。4只12V条形LED白光光源两两分布于图像采集区域两侧,为图像采集装置提供稳定光照环境。

卸料装置固定于振动平台上,主要由直线电动机和籽粒托板构成。自动考种时,经脱粒机脱粒除杂后的玉米籽粒,从入料口A自由散落至籽粒托板上。振动平台带动盛放玉米籽粒的托板进行振动,消除籽粒堆积现象后进行图像采集。随后卸料电动机推动籽粒托板形成一定角度,籽粒在重力作用下滑落,从B口滑出,完成卸料。

1.2 振动平台设计与分析

由于自由散落于籽粒托板上的玉米籽粒存在堆积情况,难以直接进行图像处理及分析,通过振动消除籽粒堆积现象后再进行图像采集及分析,可提高籽粒考种参数的测量精度。

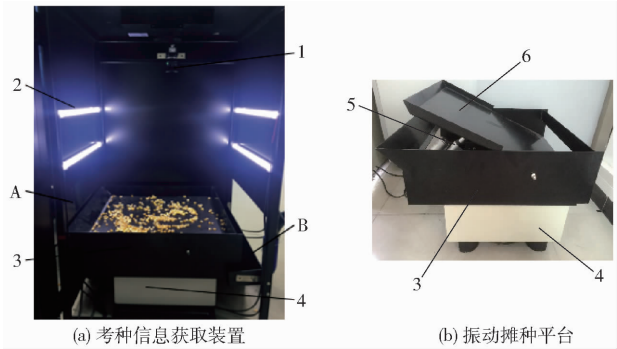


图1 籽粒考种信息获取装置

Fig. 1 Devices for test information acquisition

1. 摄像头 2. 光源 3. 卸料装置 4. 振动平台 5. 卸料电动机
6. 籽粒托板

振动平台结构由带轮驱动,如图2所示。卸料装置通过转动副与振动平台连接,主动轮带动从动轮做圆周运动,从而带动卸料装置做回旋运动。

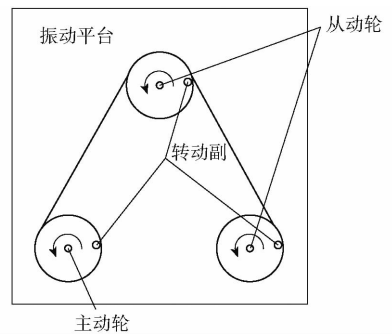


图2 振动平台结构示意图

Fig. 2 Sketch of vibration platform structure

卸料装置在做回旋运动过程中,接触的籽粒间、籽粒与托板间均存在相互作用力,主要包括:籽粒间的接触力、离心力、摩擦力等^[22],分别针对非堆积籽粒和堆积籽粒进行分析。

1.2.1 非堆积籽粒受力分析

非堆积籽粒在回旋振动过程中主要受力为离心力和摩擦力。振动平台带着籽粒做回旋运动时,籽粒所受的合力 F 为

$$F = m\omega^2 r - \mu mg \quad (1)$$

式中 m ——籽粒质量

ω ——籽粒随托板做回旋运动时的等效角速度,不同籽粒的 ω 值相同,且等于主动轮旋转角速度

r ——回旋半径,其值为主动轮圆心到主动轮转动副的距离,为常量

μ ——籽粒与托板之间的摩擦因数

g ——重力加速度

由此可见,回旋运动时,不同籽粒的加速度相同,为

$$a = \omega^2 r - \mu g \quad (2)$$

因此,非堆积籽粒在做回旋运动时,同一时刻具有相同的角速度和加速度,从而具有相同的位移。故回旋振动的方式不会导致非堆积籽粒堆积。

1.2.2 堆积籽粒受力分析

堆积籽粒受力情况复杂,通过分析 2 粒籽粒完全重叠时回旋运动过程的受力情况,探明消除堆积现象的条件,并通过试验确定与系统实现最佳配合的回旋速度和时间^[20]。理想情况下两重叠籽粒水平方向受力情况如图 3 所示。

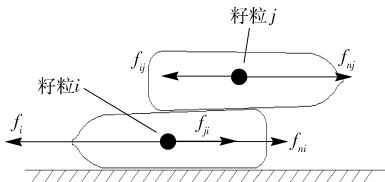


图 3 堆积籽粒受力情况

Fig. 3 Force condition of accumulated kernel

籽粒 i 在水平方向主要受离心力 $f_{ni} = m_i \omega^2 r$ 、托板对其摩擦力 $f_i = \mu(m_i + m_j)g$, 籽粒 j 对其摩擦力 $f_{ji} = \mu' m_j g$ 。籽粒 j 在水平方向主要受离心力 $f_{nj} = m_j \omega^2 r$, 籽粒 i 对其的反向摩擦力 $f_{ij} = \mu' m_j g$ 。则籽粒 i 、籽粒 j 所受的合力 F_i 、 F_j 分别为

$$F_i = m_i \omega^2 r - \mu(m_i + m_j)g + \mu' m_j g \quad (3)$$

$$F_j = m_j \omega^2 r - \mu' m_j g \quad (4)$$

式中 m_i ——籽粒 i 质量 m_j ——籽粒 j 质量
 μ' ——籽粒间的摩擦因数

当 $F_i > 0$ 或 $F_j > 0$ 时,籽粒 i 或籽粒 j 受力不平衡时,产生加速度,从而发生相对位移,在一定时间内产生相对运动,从而消除籽粒堆积情况。有

$$\omega > \sqrt{\frac{\mu(m_i + m_j)g - \mu' m_j g}{m_i r}} \quad (F_i > 0)$$

$$\omega > \sqrt{\frac{\mu' g}{r}} \quad (F_j > 0)$$

因此,实现摊种的条件为振动平台回旋角速度

$$\omega > \min \left(\sqrt{\frac{\mu(m_i + m_j)g - \mu' m_j g}{m_i r}}, \sqrt{\frac{\mu' g}{r}} \right) \quad (5)$$

通过分析可知,只有当振动平台回旋角速度大于临界值时,在一定时间作用下,方可实现堆积籽粒的平铺。由于振动过程中,不同堆积情况下籽粒质量、籽粒间的摩擦因数等未知,难以计算出回旋速度临界值的准确数值,通过试验方式确定振动平台回旋角速度。

将 500 粒玉米籽粒堆积于籽粒托板中部,设置振动平台在不同转速下工作,观察籽粒平铺效果,统计将堆积籽粒完全平铺所需时间,结果如图 4 所示。

由试验结果可知,振动平台的临界回旋角速度约为 2.5 r/s,当回旋角速度小于 2.5 r/s 时,所有籽

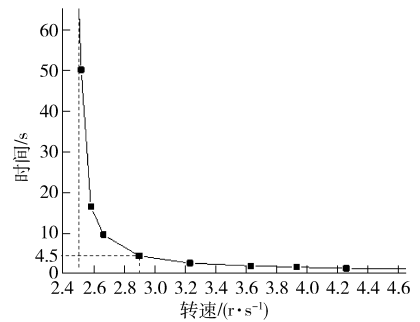
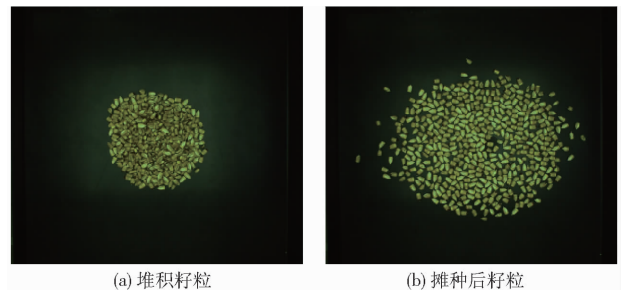


图 4 平台转速与籽粒摊开所需时间关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between rotation speed and kernel spreading time

粒受力平衡,均处于相对静止状态,无法将堆积籽粒摊开;当回旋角速度大于 2.5 r/s 时,随着回旋角速度增大,越来越多的籽粒受力不平衡,籽粒完全摊开所需时间逐步变短;当回旋角速度大于 3.2 r/s 时,所有堆积籽粒受力均超过发生位移临界点,摊种所需时间趋于稳定,但回旋角速度过大会影响振动平台的稳定运行。结合高通量考种需求和系统稳定性,将平台的回旋角速度设为 2.9 r/s,此时完全消除籽粒堆积现象需耗时约 4.5 s,满足在线检测需求。极端堆积情况下籽粒堆积情况如图 5a 所示,回旋角速度为 2.9 r/s 时,振动效果如图 5b 所示。本文后续所涉及图像均是在此转速和时间下摊种后获得。



(a) 堆积籽粒

(b) 摊种后籽粒

图 5 摊种效果图

Fig. 5 Spreading results

2 图像处理

2.1 粘连籽粒分割

2.1.1 图像获取

摄像头通过 USB 接口与计算机相连,回旋振动停止后,采用外触发方式采集籽粒图像。为降低背景干扰,提高所获图像质量,对籽粒托板进行喷黑处理。摄像头采集的原始图像尺寸为 2 592 像素 × 1 920 像素。为提高处理效率,截取原始图像中包含籽粒的有效区域进行处理,有效区域尺寸为 1 870 像素 × 1 650 像素。图 6a 为实际工作过程中采集到的玉米籽粒有效区域图像,不难看出,经振动平台振动后的籽粒虽无堆积但存在大量粘连现象。

获取原始图像后,需进行图像预处理。对经灰度变换后的原始图像进行低滤波处理,并采用自动全局阈值法二值化,使用 3×3 模板对二值图像进行开操作去除杂质后,与原始图像进行布尔运算与操作,预处理结果如图 6b 所示。

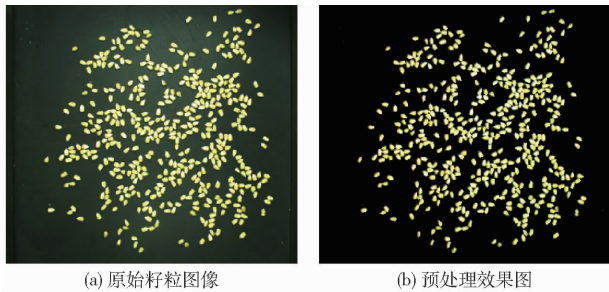


图 6 玉米籽粒预处理效果图

Fig. 6 Corn kernel images after preprocessing

2.1.2 分水岭分割

分水岭分割思想是将图像看作地貌拓扑图,各像素的灰度值对应地貌图上各点的海拔高度,每一个极小值区域对应地貌图上的集水盆,而集水盆之间的分界线形成分水岭^[23]。本文基于此思想,通过改进分水岭方法,进行粘连籽粒分割。

为便于说明,截取原始图像的局部进行分割处理。局部图像分水岭变换过程及结果如图 7 所示。图 7a 为粘连玉米图像局部预处理后得到的图像,对图 7a 二值化后采用欧氏距离变换算法^[24]构造梯度图像,如图 7b 所示,对图 7b 做分水岭变换得到分割图像,如图 7c 所示。由图 7 可知,分割结果中存在大量过分割现象。其原因是由于玉米籽粒形状不规则,距离变换后籽粒内部易形成多个极值点,分割时形成多个集水盆,导致同一籽粒被分割成多个区域。

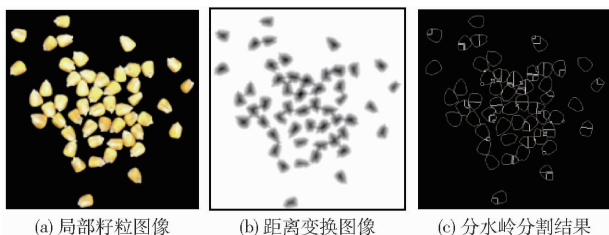


图 7 玉米图像分水岭变换

Fig. 7 Watershed transform of corn images

2.1.3 改进分割方法

为提高籽粒分割正确率,本文对分水岭分割算法进行改进。

由于同一籽粒内部的集水盆分割线极值点差值小于不同籽粒间的集水盆分割线极值点差值,基于此原理提出相邻区域融合的改进分水岭分割方法。步骤如下:

(1)使用分水岭算法对距离变换后的图像进行分割,得到初始分割结果。

(2)选定融合阈值为 T ,扫描分水岭分割后的图像,记录下所有盆地的最低点 b 。

(3)选取分水岭分割线,获取分割线中最低点值 W 。

(4)用选取分水岭中最低点 W 与分水岭两侧盆地区域的最低点 b 的值作差。若差值小于阈值 T ,则合并这 2 个相邻的分割区域,去除选取分割线。

(5)重复步骤(3)、(4),直到全部分水岭分割线判断完毕。

如图 8 所示, b_1 、 b_2 为相邻盆地中的极小值点, W 为 2 个盆地间的筑坝最低点。

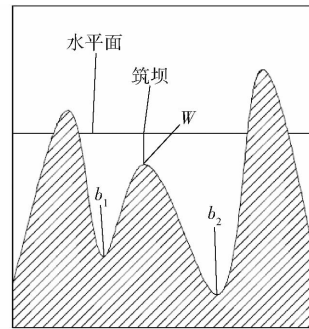


图 8 分水岭算法示意图

Fig. 8 Sketch of watershed algorithm principle

其中,步骤(4)依据

$$\max(W - b_1, W - b_2) < T \quad (6)$$

进行判断。

若式(6)成立,则该分水岭无效,融合这 2 个区域。反之,寻找下一个分割线进行比较。直到所有分水岭分割线满足式(6)的区域完全融合。

在进行分割区域融合时,不同阈值 T 的融合效果存在差异。图 9 为不同阈值 T 下对图 7c 的融合效果。当 $T=3$ 时,分割效果有较大改善,但仍存在过分割现象;当 $T=5$ 时,单个籽粒内部基本完成融合,分割效果较为理想;当 $T=7$ 时,籽粒之间的边界被破坏,出现籽粒间的融合。故本文在 $T=5$ 条件下进行过分割区域融合。

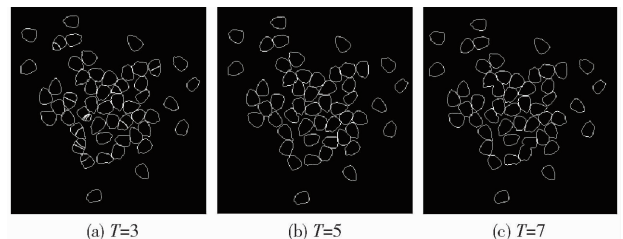


图 9 基于不同阈值的过分割区域融合

Fig. 9 Merging results based on different thresholds

采用上述方法,图 6 的分割结果如图 10 所示。

2.2 籽粒长宽获取

针对分割后的图像进行处理,以获取籽粒个数、籽粒平均长和宽等参数。分割后的图像每个连通区

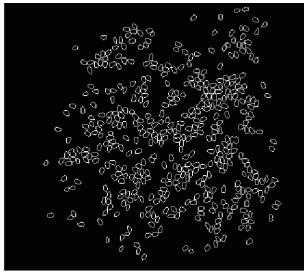


图 10 分割结果

Fig. 10 Segmentation result

域对应一个玉米籽粒,统计连通区域的数量即可获得玉米籽粒数量。

玉米籽粒长度和宽度分别对应籽粒的长轴和短轴。为提高籽粒长、宽计算速度,采用玉米籽粒投影图像最小外接矩形的长、宽代表籽粒长轴和短轴^[25]。本文基于 Graham 扫描法^[26]提取各籽粒的最小凸多边形,并建立其最小外接矩形,如图 11 所示。计算所有籽粒外接矩形长、宽的平均值,在进行高通量玉米考种过程中,用籽粒的平均长、宽来表示该穗玉米籽粒的长、宽。

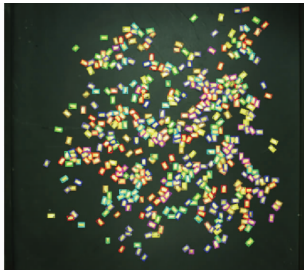


图 11 籽粒最小外接矩形

Fig. 11 Minimum circumscribed rectangle of corn

3 试验

为验证籽粒参数获取精度,选取辽宁东亚种业有限公司海南育种基地收获的待考种玉米果穗样本开展试验,随机选取 20 穗玉米果穗,依次置于单穗玉米脱粒机中,该脱粒机的处理效率为 3~5 s/穗,可实现种子的自动除尘,满足本装置使用需求。将脱粒后的玉米籽粒直接导入籽粒考种装置进行

试验。

每个果穗脱粒、籽粒考种完成后,通过人工方式数出籽粒实际数量,并测量所有籽粒的平均长宽。与考种装置利用上述算法自动算得的籽粒数量、平均长宽对比。籽粒数量检测正确率计算方法为: $1 - |检测数量 - 实际数量| / 实际数量$ 。玉米图像分割结果如表 1 所示。

表 1 玉米图像分割结果

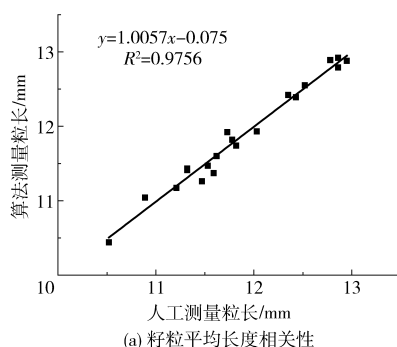
Tab. 1 Segmentation results of corn kernels images

序号	实际数量	检测数量	正确率/%	序号	实际数量	检测数量	正确率/%
1	550	555	99.09	11	287	286	99.65
2	576	579	99.48	12	228	228	100
3	408	405	99.26	13	323	324	99.69
4	412	410	99.51	14	240	241	99.58
5	443	444	99.77	15	216	215	99.54
6	331	336	99.55	16	307	313	98.05
7	373	374	99.73	17	223	222	99.55
8	434	431	99.31	18	476	473	99.36
9	185	183	98.91	19	313	313	100
10	398	403	98.74	20	389	387	99.49

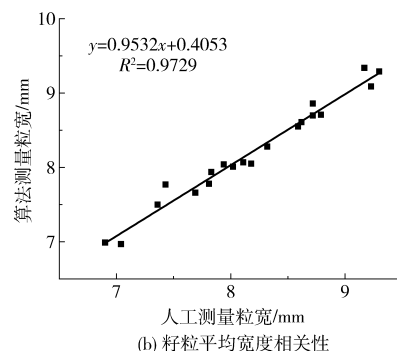
籽粒的平均长宽人工测量方法为:将所有籽粒按照长轴方向依次紧密排列,测量所有籽粒长轴之和,根据总粒数计算平均长度;将所有籽粒按照短轴方向依次紧密排列,测量所有籽粒短轴之和,根据总粒数计算平均宽度。人工测量籽粒长宽和算法测量长宽相关性如图 12 所示。

试验结果表明,本文提出的分割方法对经回旋运动后的玉米籽粒分割正确率不低于 98.05%,人工测量籽粒长宽和算法测量长宽决定系数 R^2 分别为 0.975 6 和 0.972 9,具有良好的相关性,满足玉米籽粒考种需求。

试验中出现的分割数量与实际数量的差值,主要来源于 2 部分:脱粒后经振动的玉米籽粒仍然存在少量堆积现象,在进行运算时会出现分割不完全或者融合时被合并,从而会造成漏分割;玉米籽粒经



(a) 籽粒平均长度相关性



(b) 籽粒平均宽度相关性

图 12 不同方式籽粒长、宽测定的相关性

Fig. 12 Correlation of average length and width between automatically and manually measured results

分水岭算法分割后融合不完全,从而会造成过分割。

4 结论

(1)设计的回旋振动机构实现了堆积玉米籽粒的平铺,消除自动考种过程籽粒堆积现象。

(2)为提高籽粒分割正确率,采用先分割后融合的思想,改进了分水岭。试验表明,本文算法对单穗玉米籽粒数量的检测正确率达到98.05%以上,籽粒平均长宽检测值与人工测量值间的决定系数 R^2 在0.97以上,满足玉米籽粒快速考种需求。

参 考 文 献

- 1 周金辉,马钦,朱德海,等. 基于机器视觉的玉米果穗产量组分性状测量方法[J]. 农业工程学报,2015,31(3):221-227. ZHOU Jinhui, MA Qin, ZHU Dehai, et al. Measurement method for yield component traits of maize based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(3): 221-227. (in Chinese)
- 2 IGATHINATHANE C, PORDESIMO L O, BATCHELOR W D. Major orthogonal dimensions measurement of food grains by machine vision using Image[J]. Food Research International, 2009, 42:76-84.
- 3 MA Qin, JIANG Jingtao, ZHU Dehai, et al. Rapid measurement for 3D geometric features of maize ear based on image processing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(Supp. 2): 208-212.
- 4 柳冠伊,杨小红,白明,等. 基于线阵扫描图像的玉米果穗性状检测技术[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(11):276-280. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131147&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.047. LIU Guanyi, YANG Xiaohong, BAI Ming, et al. Detecting techniques of maize ear characters based on line scan image[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 276-280. (in Chinese)
- 5 刘长青,陈兵旗. 基于机器视觉的玉米果穗参数的图像测量方法[J]. 农业工程学报,2014,30(6):131-138. LIU Changqing, CHEN Bingqi. Method of image detection for ear of corn based on computer vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(6): 131-138. (in Chinese)
- 6 LIANG X, WANG K, HUANG C, et al. A high-throughput maize kernel traits scorer based on line-scan imaging[J]. Measurement, 2016, 90:453-460.
- 7 齐龙,蒋郁,李泽华,等. 基于显微图像处理的稻瘟病菌孢子自动检测与计数方法[J]. 农业工程学报,2015,31(12):186-193. QI Long, JIANG Yu, LI Zehua, et al. Automatic detection and counting method for spores of rice blast based on micro image processing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(12): 186-193. (in Chinese)
- 8 SHAHIN M A, SYMOONS S J. Seed sizing from images of non-singulated grain samples[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2005, 47(3): 49-55.
- 9 HUANG Z, JIANG S, YANG Z, et al. Automatic multi-organ segmentation of prostate magnetic resonance images using watershed and nonsubsampling contourlet transform[J]. Biomedical Signal Processing & Control, 2016, 25:53-61.
- 10 王开义,张水发,杨锋,等. 基于分水岭和改进MRF的马铃薯丁粘连图像在线分割[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(9):187-192. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130933&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.033. WANG Kaiyi, ZHANG Shuifa, YANG Feng, et al. Online segmentation of clustering diced-potatoes using watershed and improved MRF algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 187-192. (in Chinese)
- 11 柳冠伊,刘平义,魏文军,等. 玉米果穗粘连籽粒图像分割方法[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(9):285-290. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140946&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.046. LIU Guanyi, LIU Pingyi, WEI Wenjun, et al. Method of image segmentation for touching maize kernels[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 285-290. (in Chinese)
- 12 UZUNBAS M G, CHEN C, METAXAS D. An efficient conditional random field approach for automatic and interactive neuron segmentation[J]. Medical Image Analysis, 2016, 27:31-34.
- 13 张亚秋,吴文福,王刚. 基于逐步改变阈值方法的玉米种子图像分割[J]. 农业工程学报,2011,27(7):200-204. ZHANG Yaqiu, WU Wenfu, WANG Gang. Separation of corn seeds images based on threshold changed gradually[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(7): 200-204. (in Chinese)
- 14 张成梁,李蕾,董全成,等. 基于颜色和形状特征的机采棉杂质识别方法[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):28-34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160705&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.005. ZHANG Chengliang, LI Lei, DONG Quancheng, et al. Recognition method for machine-harvested cotton impurities based on color and shape features[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 28-34. (in Chinese)
- 15 牛杰,卜雄洙,钱堃,等. 利用骨架特征信息的粘连谷粒图像分割方法[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(9):280-284.

- [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140945&journal_id = jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140945&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.045.
- NIU Jie, BU Xiongzhu, QIAN Kun, et al. Touching corn kernels based on skeleton features information[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9):280 - 284. (in Chinese)
- 16 GAO Hua, WANG Yaqin, GE Pingju. Research on segmentation algorithm of adhesive plant grain [C] // 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, 2007: 2927 - 2930.
- 17 荀一, 鲍官军, 杨庆华, 等. 粘连玉米籽粒图像的自动分割方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4):163 - 167.
XUN Yi, BAO Guanjun, YANG Qinghua, et al. Automatic segmentation of touching corn kernels in digital image [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4):163 - 167. (in Chinese)
- 18 KANTIP K, WASIN S. Segmentation algorithm for touching round grain image [C] // 2010 International Conference on Electronics and Information Engineering, 2010: 1263 - 1266.
- 19 杨蜀秦, 宁纪锋, 何东健. 一种基于主动轮廓模型的连接米粒图像分割算法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2):207 - 211.
YANG Shuqin, NING Jifeng, HE Dongjian. Image segmentation algorithm of touching rice kernels based on active contour model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(2):207 - 211. (in Chinese)
- 20 王侨, 陈兵旗, 朱德利, 等. 基于机器视觉的定向播种用玉米种粒精选装置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2):27 - 37. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170204&journal_id = jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170204&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.004.
WANG Qiao, CHEN Bingqi, ZHU Deli, et al. Machine vision-based selection machine of corn seed used for directional seeding [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2):27 - 37. (in Chinese)
- 21 刘长青, 陈兵旗, 张新会, 等. 玉米定向精播种粒形态与品质动态检测方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9):47 - 54. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150907&journal_id = jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150907&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.007.
LIU Changqing, CHEN Bingqi, ZHANG Xinhui, et al. Dynamic detection of corn seeds for directional precision seeding [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):47 - 54. (in Chinese)
- 22 刘举, 白鹏博, 凡凤仙, 等. 竖直振动下颗粒物质的行为模式研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(7):1956 - 1962.
LIU Ju, BAI Pengbo, FAN Fengxian, et al. Research progress on behavior mode of granular matter under vertical vibration [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(7):1956 - 1962. (in Chinese)
- 23 沈夏炯, 吴晓洋, 韩道军. 分水岭分割算法研究综述[J]. 计算机工程, 2015, 41(10):26 - 30.
SHEN Xiajiong, WU Xiaoyang, HAN Daojun. Survey of research on watershed segmentation algorithms [J]. Computer Engineering, 2015, 41(10):26 - 30. (in Chinese)
- 24 缪慧司, 梁光明, 刘任任, 等. 结合距离变换与边缘梯度的分水岭血细胞分割[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(2):192 - 198.
MIAO Huisi, LIANG Guangming, LIU Renren, et al. Watershed algorithm using edge gradient combined with distance transformation for segmentation of blood cells [J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(2):192 - 198. (in Chinese)
- 25 汪珂, 梁秀英, 宗力, 等. 玉米籽粒性状高通量测量装置设计与实现[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(2):94 - 99.
WANG Ke, LIANG Xiuying, ZONG Li, et al. Design and realization of a high-throughput maize kernel trait extraction system [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(2):94 - 99. (in Chinese)
- 26 吴文周, 李利番, 王结臣. 平面点集凸包 Graham 算法的改进[J]. 测绘科学, 2010, 35(6):123 - 125.
WU Wenzhou, LI Lifan, WANG Jiechen. An improved Graham algorithm for determining the convex hull of planar points set [J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(6):123 - 125. (in Chinese)