

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.042

基于机器视觉的玉米果穗性状参数测量方法研究

吴刚¹ 吴云帆¹ 陈度^{1,2} 李宝胜¹ 郑永军¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 在玉米育种、田间测产和提高玉米产量的过程中,均需要对玉米果穗考种,即需要对玉米果穗的穗长、穗粗、穗行数、行粒数和穗粒数等性状参数进行测量。人工考种不仅花费大量的人力物力,而且在考种过程中普遍存在人工劳动强度大、观测效率低、人为干扰导致测试结果不客观及不准确等问题,在很大程度上限制了考种的速度与精度。针对上述问题,利用所研制的自动考种设备和机器视觉方法,通过 USB 工业相机获取玉米果穗单面性状彩色图像,利用 $|B - R|$ 模型、 $(G + B)/2$ 模型将彩色图像分别进行灰度化,利用改进后的一维最大熵阈值分割方法对灰度图像进行二值化,分别得到果穗轮廓二值图像和果穗特征二值图像;通过轮廓二值图像计算果穗放置后的倾斜角,实现果穗轮廓二值图像和特征二值图像的自动纠偏;通过相机标定,得到单位像素对应的实际值,进而得到穗长及穗粗;通过提取局部籽粒特征二值图像,利用水平黑背景点扫描及对扫描曲线的修正获取穗行宽度,通过穗行数修正模型得到果穗的穗行数;通过提取局部单行籽粒特征二值图像,利用垂直黑背景点扫描及对扫描曲线的修正得到行粒数;根据行粒数和穗行数得到穗粒数。试验结果表明,穗长和穗粗平均测量精度分别为 98.05% 和 97.99%,穗行数测量正确率为 95%,行粒数平均测量精度为 96.29%,穗粒数平均测量精度为 95.67%,和实际值相比,穗粗、穗长、行粒数及穗粒数的测量值差异无显著性。单穗玉米果穗机器视觉平均测量速度为 600 ms/穗,考种设备测量速度为 6 s/穗,能够满足自动考种设备的使用需求。

关键词: 机器视觉; 图像处理; 玉米; 考种; 穗行数; 行粒数

中图分类号: S513; TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0357-09

Measurement Method of Maize Ear Characters Based on Machine Vision

WU Gang¹ WU Yunfan¹ CHEN Du^{1,2} LI Baosheng¹ ZHENG Yongjun¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In the process of maize breeding, yield tests and the improvement of maize production and the examination, including the measurement of the length, diameters, row numbers, grain numbers per row and grain numbers of ears, is necessary. However, manual examination utilized for a long time not only needs to spend a lot of manpower and resources, but also has many problems, such as high labor intensity, low efficiency of observation and the non-objective and inaccurate results caused by human interference, greatly limiting the speed and accuracy of the operation. Therefore, an automatic equipment of examination with the machine-vision was presented. The colour images of single-face characters of maize ears were obtained by industrial cameras through USB. Then the model $|B - R|$ and $(G + B)/2$ were respectively applied to gray the colour images. After that, the method of segmentation of one-dimension maximum entropy was used to achieve binaryzation, obtaining binary images of contours and features of ears separately. Moreover, these two kinds of images were corrected automatically by the calculation of angles of ear contours of binary images. Based on the calibration of cameras, the unit pixel corresponding to the actual value could be gained and then the length and diameters of ears could be calculated. In addition, the width of rows of ears could be got by the scanning of points of horizontal black background and correction of scanning curves, according to the extraction of local features of binaryzation images. The number of rows of ears could be obtained by the modified model of numbers of

收稿日期: 2020-08-17 修回日期: 2020-09-17
基金项目: 北京市重点实验室 2018 年度科技创新基地培育与发展专项
作者简介: 吴刚(1977—),男,副教授,博士,主要从事机器视觉与机电一体化技术研究,E-mail: wugang@cau.edu.cn
通信作者: 陈度(1981—),男,高级工程师,博士,主要从事机器视觉与测控技术研究,E-mail: tchendu@cau.edu.cn

rows. Furthermore, by the extraction of binaryzation images of local features of single line of grains, the number of grains of rows could be obtained, based on the scanning of the points of black background and its modified curve. Finally, the total number of grains of ears could be computed by the numbers of rows and that of grains in single row. The experimental results showed that the average accuracy of measurement of ear length and ear diameter were 98.05% and 97.99%; the correct rate of measurement of row numbers was 95%; the average measurement accuracy of the number of grains per row was 96.29%; and the average accuracy of measurement of grain numbers was 95.67%. Furthermore, T-test was conducted to compare the difference with the standard value, demonstrating that there was no significant difference and the equipment was of reliability. The average speed of measurement of the whole ear was less than 600 ms per ear, and the measurement speed of the test system was within 6 s per ear, meeting the requirement of the automatic equipment of examination. This research provided the basis of equipment and technology for the modern seed industry, even for the development of agricultural information technology.

Key words: machine vision; image processing; maize; variety test; ear rows; kernels per row

0 引言

玉米作为我国主要粮食作物之一,其产量在食品、饲料等行业中一直备受关注。玉米产量由于品种、栽培条件、种植水平和自然气候不同,产量的构成也有很大差异。因此,通过室内考种,用以分析在不同条件下的合理产量结构,研究在高产条件下,获取穗大、粒多、粒大的效果,进一步实现高产。传统的玉米果穗考种方法为人工手动测量,需测量玉米果穗穗长、穗粗、穗行数、行粒数和穗粒数等性状参数,人工考种不仅花费大量的人力物力,而且在考种过程中普遍存在人工劳动强度大、观测效率低、人为干扰导致测试结果不客观及不准确等问题,在很大程度上限制了考种的速度与精度^[1]。

随着图像处理技术的发展,其应用范围也变得十分广泛,如机器人视觉^[2]、生物医药工程^[3]、通信工程^[4]等。近几年图像处理技术在农业上的应用也不断增多,如玉米倒伏面积提取、农作物遥感技术、棉花铺膜装置导航、苹果采摘机器人、农作物虫害检测^[5-10]等。

目前基于机器视觉的玉米果穗性状参数测量方法已有相关研究,吕永春等^[11]使用背景板比例尺方法计算出单位像素对应长度并以此为参考实现准确计算玉米长度和宽度,准确率可以达到 96.01%,解决了传统手动测量精度低、速度慢的问题。刘长青等^[12]使用计算机摄像头连续采集旋转台上的玉米果穗图像,能够在一幅图中显示出完整的玉米图像,该方法对果穗的长度、宽度和行数测量精度达到 98%,粒数准确率在 96% 以上,检测速度为 102 s/穗。柳冠伊等^[13-14]以线阵扫描来获取玉米果穗表面圆周图像信息,然后利用归一化互相关算法完成玉米果穗周围的精确分割,利用拼接技术提高准确度,结果显示穗粒数的准确率为 94.6%。周金辉

等^[15]建立玉米果穗的投影修正模型、穗行数快速估算模型、行粒数计算模型,以此精确计算穗长、穗粗、穗行数以及行粒数等性状参数,穗行数计算结果的零误差率为 93%,检测速度达到 30 穗/min 以上。王传宇等^[16]进行了全景技术的机器视觉测量玉米果穗考种指标的研究。杜建军等^[17]、KANTIP 等^[18]分别进行了基于分级阈值和多级筛分的玉米果穗穗粒分割方法研究。宋鹏等^[19]进行了基于多相机成像的玉米果穗考种参数高通量自动提取方法研究,其穗行数、行粒数的测量精度分别达 98.63%、95.35%。

综上所述,基于机器视觉的玉米果穗性状参数测量方法是采用不同设备来完成的,即玉米果穗原始图像的获取方法不同,图像获取的背景也不同,且需要人工装卸玉米果穗。为了能够实现在考种过程中玉米果穗自动喂料、自动排序、自动采集图像和自动称量,研制玉米果穗自动考种设备,并利用所研制的自动考种设备对完整玉米果穗进行机器视觉性状参数测量(即玉米果穗的无损测量),包括玉米果穗的穗长、穗粗、穗行数、行粒数和穗粒数等,为玉米果穗性状参数检测的自动化提供技术和设备基础,为玉米育种和田间测产提供依据。

1 试验设备

试验设备主要由直线振动喂料机构、横行定位传输机构、气动夹取搬运机构、图像采集平台、称量平台、可编程控制器(Programmable logic controller, PLC)和计算机等组成^[20],其中图像采集装置由 USB 工业相机和载物玻璃板组成,其三维装配图如图 1 所示,实物图如图 2 所示。

试验设备工作过程为:在 PLC 的控制下,首先玉米果穗通过直线振动喂料机向横向定位传输机构的首端自动喂料;然后在横向定位传输机构的

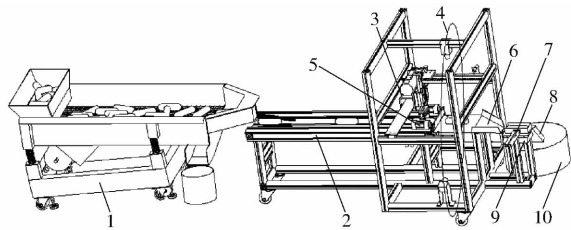


图 1 系统整体机械结构三维装配图

Fig. 1 Three-dimensional assembly drawing of overall system mechanical structure

1. 直线振动喂料机 2. 横向定位传输机构 3. 气动夹取搬运机构 4. 图像采集平台 5. 上推送机构 6. 上滑道 7. 下推送机构 8. 下滑道 9. 称量平台 10. 玉米果穗收集箱

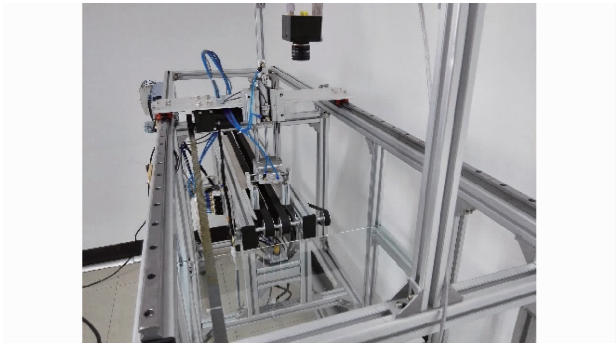


图 2 试验设备实物图

Fig. 2 Physical diagram of test equipment

作用下将玉米果穗进行横向定位,并将玉米果穗传送到横向定位传输机构的末端,经安装在该末端的光电开关检测后(光电开关检测到玉米果穗时,PLC 关闭直线振动喂料机的振动电动机及横向定位传输机构的传送电动机,反之则启动上述电动机),由 PLC 控制气动夹取搬运机构将玉米果穗夹取并搬运至图像采集平台的透明玻璃板上,待气动夹取搬运机构返回初始位置后,PLC 经串口向计算机发送图像采集命令,计算机接收到该命令后控制 USB 接口工业相机进行玉米果穗图像采集,待图像采集完成后计算机通过串口向 PLC 发送图像采集完成信息,并对所采集的图像进行处理及测量,PLC 接收到图像采集完成信息后控制上推送机构将玉米果穗经上滑道推送至称量平台,称量平台检测到 PLC 允许称量触发信号并待其测量结果稳定后,将其称量数据通过串口传送到计算机并存储;最后计算机通过串口向 PLC 发送称量完成信息,PLC 接收后则控制下推送机构将称量后的玉米果穗推送至玉米果穗收集箱中,至此该玉米果穗检测完毕,再重复下一次。

为了满足玉米果穗考种系统自动采集图像的要求,设计了一种可安装 3 台工业相机的图像采集平台。图 3 为图像采集平台结构图,主要由 3 台 USB 工业相机和载物玻璃板组成。3 台工业相机安装于

机架,且 3 台工业相机分布在同一圆周并两两相隔 120° ,其中 1 号工业相机(主相机)安装于玉米果穗正上方,拍摄高度 $h = 500\text{ mm}$;当仅采用主相机进行图像采集时,可将载物玻璃板更换为带定位槽的背景板。同时,为了避免玉米果穗被放置于图像采集平台后发生滚动,通过调整提升气缸上的液压阻尼器及载物玻璃板或背景板的安装高度,在放置玉米果穗时,使其底面距离载物玻璃板或背景板高度差在 2 mm 以内,同时通过水平尺将载物玻璃板调整至水平,以稳定玉米果穗被置于载物玻璃板后的位姿。

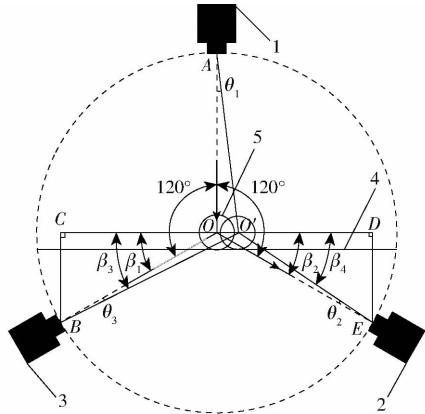


图 3 图像采集平台结构图

Fig. 3 Structure chart of image acquisition

1. USB 工业相机(主相机) 2,3. USB 工业相机(辅助相机) 4. 载物玻璃板 5. 玉米果穗

经统计,玉米果穗平均穗粗 W 约为 50 mm ,穗行平均宽度 w 约为 10 mm 。玉米果穗被置于图像采集平台后其最大横向位移量 $l_{OO'} = w/2$, $l_{AO} = l_{BO} = l_{EO} = h - W/2$, $\beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$, $l_{CB} = l_{DE} = l_{BO} \sin \beta_1$, $l_{CD} = l_{DO} = l_{BO} \cos \beta_1$, $l_{CO'} = l_{CO} + l_{OO'}$, $\beta_3 = \arctan(l_{CB}/l_{CO'})$, $l_{DO'} = l_{DO} - l_{OO'}$, $\beta_4 = \arctan(l_{DE}/l_{DO'})$,则主相机 1、辅助相机 2 和辅助相机 3 的光轴与玉米果穗轴心的最大偏角 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 计算式分别为

$$\theta_1 = \arctan(l_{OO'}/l_{AO}) = 0.6031^\circ \tag{1}$$

$$\theta_2 = \beta_4 - \beta_2 = 0.3043^\circ \tag{2}$$

$$\theta_3 = \beta_3 - \beta_1 = 0.2988^\circ \tag{3}$$

根据以上分析,试验设备在满足装配精度的条件下,玉米果穗能够保持在 3 台工业相机光轴的垂线上,为后续的机器视觉测量提供保障。

图像采集试验环境为光线柔和明亮的室内(无特殊光源)。相机型号为大恒 DH-HV3151UC,USB 接口,310 万像素彩色图像,图像分辨率为 $2048\text{ 像素} \times 1536\text{ 像素}$ 。计算机配置为 CPU i7-4700MQ,主频 2.4 GHz ,内存 8 GB 。

本研究仅采用载物玻璃板正上方 USB 工业相机(主相机)采集玉米果穗图像,且在玉米果穗进入

试验设备前,人工剔除异形玉米果穗。

2 果穗图像预处理

根据玉米果穗实际成像区域,试验后将原始图像裁剪成分辨率为 1 480 像素 × 640 像素,如图 4 所示。

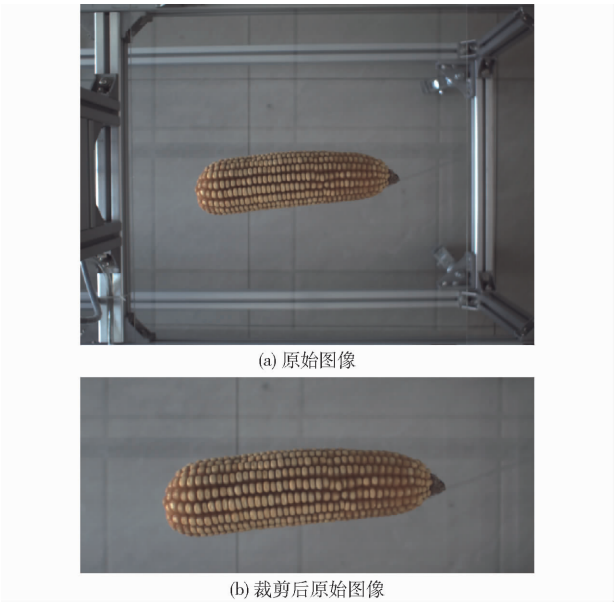


图 4 原始图像预处理

Fig.4 Original image preprocessing

2.1 果穗图像分割

由于图像采集试验环境的限制,难以采用固定阈值方法对玉米果穗图像进行分割,因此需采用自适应阈值分割。常用的自适应阈值分割方法有最大类间方差法(Nobuyuki Otsu, Otsu)、迭代阈值法和最大熵阈值分割法等。采用模型 $(G + B)/2$ 将裁剪后原始图像进行灰度处理,并进行图像分割,如图 5 所示。

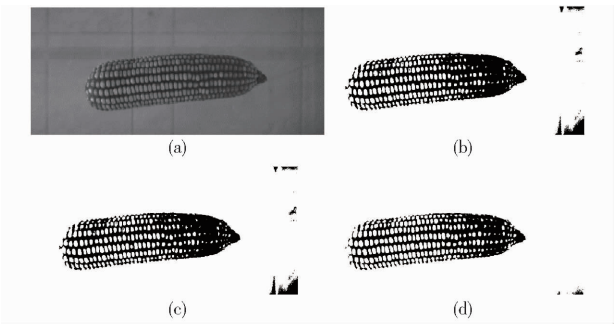


图 5 图像分割效果

Fig.5 Results of image segmentation

图 5d 由于其籽粒特征保留较好,且噪声点较少,因此研究拟采用一维最大熵阈值分割法来分割图像。最大熵阈值分割法是将香农信息熵的概念应用于图像阈值化,其基本思想是利用图像的灰度分布密度函数定义图像的信息熵,根据假设或视角提出不同的熵准则,最后通过优化该准则得到阈值^[21-22]。

根据信息论,熵定义为

$$H = - \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \lg p(x) dx \tag{4}$$

式中 H ——信息熵
 $p(x)$ ——随机变量 x 的概率密度函数

对于数字图像,随机变量 x 可以是灰度、区域灰度、梯度等特征。所谓灰度的一维熵最大,就是选择一个阈值,使图像用这个阈值分割出的两部分的一阶灰度统计的信息量最大。图像灰度直方图如图 6 所示。

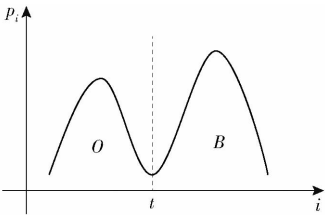


图 6 一维直方图

Fig.6 One-dimensional histogram

假设原始灰度图像有 L 个灰度级,图中灰度级低于 t 的像素点构成目标区域 O ,灰度级高于 t 的像素点构成背景区域 B ,则在其本区域的分布概率分别是

$$P_O = p_i / p_t \quad (i = 1, 2, \dots, t) \tag{5}$$

$$P_B = p_i / (1 - p_t) \quad (i = t + 1, t + 2, \dots, L) \tag{6}$$

其中
$$p_t = \sum_{i=1}^t p_i \tag{7}$$

式中 P_O —— O 区域的概率

P_B —— B 区域的概率

对于数字图像,目标区域和背景区域的信息熵分别定义为

$$\begin{cases} H_O(t) = - \sum_i (p_i / p_t) \lg (p_i / p_t) & (i = 1, 2, \dots, t) \\ H_B(t) = - \sum_i [p_i / (1 - p_t)] \lg [p_i / (1 - p_t)] & (i = t + 1, t + 2, \dots, L) \end{cases} \tag{8}$$

式中 $H_O(t)$ ——目标区域信息熵

$H_B(t)$ ——背景区域信息熵

则熵函数定义为

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= H_O + H_B = \\ &\lg(p_t(1 - p_t)) + \frac{H_t}{p_t} + \frac{H_L - H_t}{1 - p_t} \end{aligned} \tag{9}$$

其中
$$H_t = - \sum_i p_i \lg p_i \quad (i = 1, 2, \dots, t)$$

$$H_L = - \sum_i p_i \lg p_i \quad (i = t + 1, t + 2, \dots, L)$$

式中 $\varphi(t)$ ——熵函数

H_t —— $i = 1, 2, \dots, t$ 时信息熵

H_L —— $i = t + 1, t + 2, \dots, L$ 时信息熵

当熵函数取最大值时,对应的灰度 t^* 就是所求的最佳阈值,即

$$t^* = \operatorname{argmax} \{ \varphi(t) \} \tag{10}$$

2.2 玉米果穗轮廓提取

玉米果穗轮廓提取的准确性对后续穗长和穗粗的测量精度影响较大。由于玉米果穗图像采集的实际试验环境限制,以及相机存在自动白平衡和自动曝光色差等问题,传统的色彩通道分离方法经试验后无法准确提取果穗轮廓。基于上述问题,经研究分析对比后,首先开辟新的内存空间并采用 $|B-R|$ 模型将裁剪后原始图像进行灰度处理;然后采用一维最大熵阈值分割方法对灰度图像进行二值化,并对二值图像进行去噪;最后通过水平和垂直扫描确定目标区域得到后续轮廓二值图像,如图 7 所示。其中,为了加快算法速度,经试验后,一维最大熵阈值分割方法的阈值搜索范围为灰度级 $[10, 50]$ 。



图 7 玉米果穗轮廓提取效果
Fig. 7 Extraction effect of maize ear contour

2.3 玉米果穗倾斜角计算

玉米果穗在其重心位置和底部形状特征等因素的影响下,可能在被置于载物玻璃板后发生倾斜,为了保障后续性状参数测量的准确性,需要计算玉米果穗倾斜角。通过观察发现,玉米果穗在其轴向的中心位置附近其生长的均匀性较玉米果穗两端要好,玉米果穗倾斜角 δ 的计算方法为:

(1) 设轮廓二值图像宽度为 W'_c , 分别距离图像左侧 $0.4W'_c$ 和 $0.6W'_c$ 设立垂直基准线,从基准线开始向右自上而下、自下而上搜索玉米果穗轮廓的边缘点各 10 个,并计算上述边缘点坐标平均值,分别记为 $A'(\bar{x}_a, \bar{y}_a)$ 和 $B'(\bar{x}_b, \bar{y}_b)$; 同理,从基准线开始向左自上而下、自下而上搜索玉米果穗轮廓的边缘点各 10 个,并计算上述边缘点坐标平均值,分别记为 $C'(\bar{x}_c, \bar{y}_c)$ 和 $D'(\bar{x}_d, \bar{y}_d)$ 。

(2) 计算线段 $A'B'$ 和 $C'D'$ 的中点坐标,分别记为 $E(x_e, y_e)$ 和 $F(x_f, y_f)$, 线段与水平方向的夹角即为玉米果穗倾斜角,计算式为

$$\delta = \arctan((y_f - y_e) / (x_f - x_e)) \tag{11}$$

经试验后,玉米果穗倾斜角如果满足 $|\delta| > 1^\circ$, 则将轮廓二值图像旋转 $-\delta$, 如图 8 所示。

2.4 玉米果穗特征提取

玉米果穗特征提取的效果对后续穗行数、行粒数以及穗粒数的测量精度影响较大。经研究分



图 8 玉米果穗轮廓旋转效果
Fig. 8 Rotation effect of ear contour

析并对比后,首先采用模型 $(G+B)/2$ 将裁剪后原始图像进行灰度处理;然后采用一维最大熵阈值分割方法对灰度图像进行二值化,并对二值图像进行去噪;最后通过水平和垂直扫描确定目标区域得到后续特征二值图像,如图 9a 所示。其中,为了加快算法速度,经试验后,一维最大熵阈值分割方法的阈值搜索范围为灰度级 $[50, 90]$ 。如果玉米果穗倾角 $|\delta| > 1^\circ$, 则将特征二值图像旋转 $-\delta$, 如图 9b 所示。

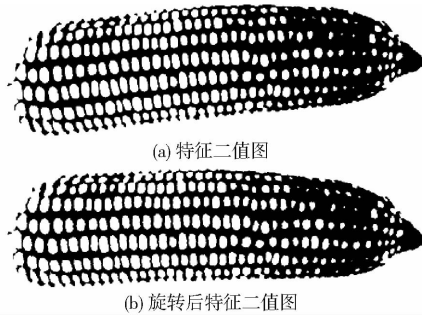


图 9 玉米果穗特征提取效果
Fig. 9 Maize ear feature extraction effect

3 玉米果穗性状参数测量算法

测量前对 USB 工业相机进行标定,求出单位像素对应的实际长度(标定值),记做 $p(0.192 \text{ mm/像素})$ 。

3.1 穗长与穗粗测量

玉米果穗秃尖部分的颜色主要有偏白色和偏红色两种。在玉米果穗轮廓提取过程中,偏红色的秃尖会被抑制掉,偏白色秃尖会被保留;而在玉米果穗特征提取的过程中,偏白色的秃尖会被抑制掉,而保留偏红色的秃尖。根据这一特征,穗长 a 测量方法为:设旋转后特征二值图像宽度为 W_f , 旋转后轮廓二值图像宽度为 W_c , 如果 $W_f \geq W_c$, 则穗长 $a = W_f p$; 若 $W_f < W_c$, 则穗长 $a = W_c p$ 。

因旋转后轮廓二值图像保留了玉米果穗完整的轮廓,所以选用旋转后轮廓二值图像测量穗粗,其测量方法为:距离图像左侧 $0.5W_c - 5$ 像素处设立基准线 l , 从基准线 l 开始向右连续求得 10 个像素内的穗粗并计算其平均值,记为 $\bar{b}$, 则穗粗 $b = \bar{b} p$ 。

3.2 穗行数与行粒数测量

玉米果穗在其分化过程中通过生长锥伸长,出现小穗原基,每个小穗原基又迅速分裂为 2 个小突起,形成 2 个并列小穗,因穗行数与小穗是一致的,

而小穗一定为偶数,所以玉米果穗的穗行数一般为偶数行,且穗行数一般在 10 ~ 22 行之间,即果穗成像面至少有 5 行。根据以上玉米果穗的生物学特征,穗行数 m 测量方法为:

(1) 设旋转后特征二值图像高度为 H_f , 分别距旋转后特征二值图像左侧 $0.4W_f$ 和 $0.6W_f$ 处设立垂直基准线, 距离图像顶部 $0.2H_f$ 和 $0.8H_f$ 处设立水平基准线, 提取 4 条基准线所围区域内的局部籽粒特征二值图像, 如图 10 所示。



图 10 局部籽粒特征二值图
Fig. 10 Partial feature binary image

(2) 对局部籽粒特征二值图像从上向下逐行扫描, 求取每一行黑背景点 (像素值为 0) 个数, 并将其存储在数组 H_i (i 为行数) 中。图 11 表示每行 (水平方向) 黑背景点的分布情况, 其横坐标为图像的行数, 纵坐标为每行黑背景点个数, 图中曲线 1 即为 H_i 分布曲线, 水平直线 l_1 为 H_i 的平均值 (即黑背景点平均值), 记为 c (个数), 垂直直线 l_2 为行数的中心线; 为了避免曲线 1 出现局部非连续多峰值的情况, 对 H_i 中数据做如下修正, 即如果 $H(i) \geq c$, 则 $H(i) = 0.2W_f$, H_i 的修正曲线如图 11 中曲线 2 所示。

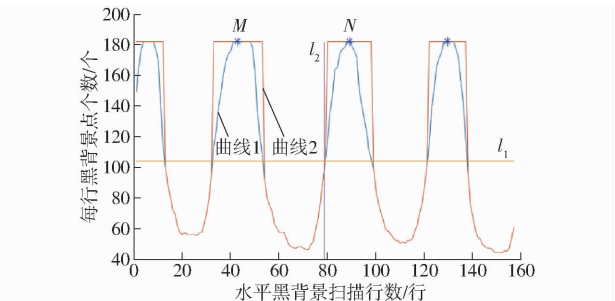


图 11 每行 (水平方向) 黑背景点分布图
Fig. 11 Distribution diagram of black background points in each line (horizontal direction)

(3) 对于图 11 中的曲线 2, 从左到右搜索数值为 $0.2W_f$ 的各连续段, 记录每个连续段的起始点和终止点坐标 (如果起始点坐标与终止点坐标在首行或在末行, 则舍弃该段), 计算每段的中点坐标, 依次为 $x_a(0)$ 、 $x_a(1)$ 、 $\cdots$ 、 $x_a(k)$, 则果穗穗行宽度 $d = (x_a(k) - x_a(0)) / k$ 。

(4) 由于玉米果穗的穗行是在圆周方向生长, 为了提高穗行数测量的准确性, 引入穗行数修正模型, 如图 12 所示, 其中线段 PQ 的长度为 d , 线段 OP 、 OQ 的长度为 $\bar{b}/2$, 弧 PQ 对应的圆心角为 γ , 设弧 PQ 长度为 e , m' 为玉米果穗的实际穗行数, 则弧 PQ 长度 e 的计算公式为

$$e = \pi d / (m' \sin(\gamma/2)) \tag{12}$$

其中

$$\gamma = 360 / m'$$

穗行数 m 计算公式为

$$m = \pi \bar{b} / e = m' \sin(\gamma/2) \bar{b} / d \tag{13}$$

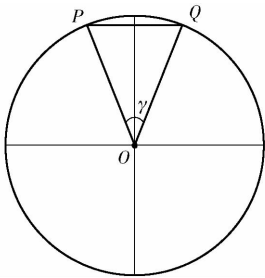


图 12 穗行数修正模型
Fig. 12 Correction model of ear rows

由于玉米果穗的实际穗行数一般在 10 ~ 22 行之间, 分别将 10 行和 22 行代入 $m' \sin(\gamma/2)$ 中, 并取其计算结果的平均值, 则穗行数 m 的最终计算公式为

$$m = 3.11055 \bar{b} / d \tag{14}$$

行粒数 n (粒数) 测量方法为:

(1) 在 $x_a(0)$ 、 $x_a(1)$ 、 $\cdots$ 、 $x_a(k)$ 中, 求取距离直线 l_2 最近的两坐标点。图 11 中点 M 、 N 即为所求坐标点位置, 其坐标分别为 $x_a(i)$ 、 $x_a(i+1)$, $i \in [0, k-1]$ 。对局部籽粒特征二值图像, 分别距离图像顶部 $x_a(i)$ 和 $x_a(i+1)$ 处设立水平基准线, 提取两条基准线间的单行籽粒特征二值图像, 如图 13 所示。



图 13 单行籽粒特征二值图
Fig. 13 Single-row grain feature binary image

(2) 对单行籽粒特征二值图像, 从左到右逐列扫描图像, 求取每列图像的黑背景点个数, 将其存储在数组 V_j (j 为列数) 中。图 14 (对应图 13) 表示每列 (垂直方向) 黑背景点分布图, 横坐标为图像列数, 纵坐标为每列黑背景点个数, 图 14 中曲线 3 为 V_j 分布曲线, 水平线 l_3 为 V_j 平均值 (即黑背景点平均值), 记为 f , 垂直直线 l_4 为列数的中心线; 为了避免曲线 3 出现局部非连续多峰值的情况, 对 V_j 中数据做如下修正, 即如果 $V(j) \geq f$, 则 $V(j) = x_a(i+1) - x_a(i) + 1$, V_j 的修正曲线如图 14 中曲线 4 所示。

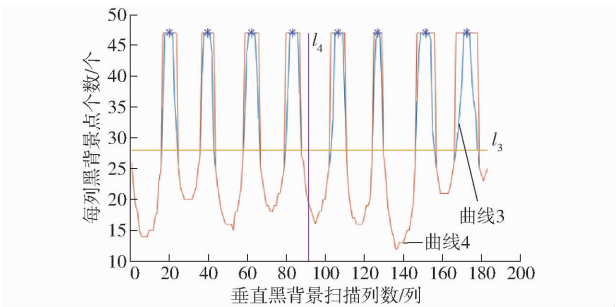


图 14 每列（垂直方向）黑背景点分布曲线
Fig. 14 Distribution diagram of black background points in each column (vertical direction)

(3)对于曲线 4,从左到右搜索数值为 $x_a(i+1) - x_a(i) + 1$ 的各连续段,记录每个连续段的起始点和终止点坐标(如果起始点坐标与终止点坐标在首行或在末行,则舍弃该段),计算每段的中点坐标,依次为 $x_b(0)、x_b(1)、\cdots、x_b(t)$,经试验,设 $g = 1.1(x_b(t) - x_b(0))/t$,如果 $W_f \geq W_c$,则行粒数 $n = W_c/g$,若 $W_f < W_c, n = W_f/g$ 。

4 试验

试验前由人工手动剔除香蕉穗、弯曲穗、空秆等结实异常及畸形的玉米果穗。取 20 穗玉米果穗样本作为测量对象,如图 15 所示。首先利用考种设备

对 20 穗玉米果穗进行图像采集和测量,然后根据玉米果穗下线顺序依次对其进行编号,最后人工测量编号后玉米果穗的穗长、穗宽、穗行数和穗粒数。其中穗长、穗粗的测量使用量程为 300 mm、精度为 0.02 mm 的游标卡尺(考虑到实际应用情况,实际测量精度为 0.1 mm),穗粗测量位置为果穗轴线方向的中间位置。由于玉米果穗的穗行数一般为偶数行,因此对穗行数测量值接近偶数取值,并将该值作为穗行数的测量结果。又由于穗行数真值能够人工测得,因此采用正确率来衡量其精度,即测量正确的穗行数样本数量占总样本数量的百分比。玉米果穗测量试验结果如表 1 所示。



图 15 玉米果穗样本
Fig. 15 Maize ear samples

表 1 试验结果
Tab.1 Results of experiment

果穗 序号	穗长实际 值/mm	穗长测量 值/mm	穗粗实际 值/mm	穗粗测量 值/mm	穗行数实 际值/行	穗行数测 量值/行	穗行数近 偶值/行	行粒数实 际值/粒	行粒数测 量值/粒	穗粒数实 际值/粒	穗粒数测 量值/粒
1	186.2	185.1	47.7	47.4	16	16.0	16	38	38.3	624	612.5
2	203.3	203.5	45.4	44.2	16	15.9	16	42	40.9	687	654.0
3	177.0	181.1	43.3	43.2	14	13.2	14	38	37.2	506	520.8
4	172.6	175.5	48.6	48.4	18	18.1	18	35	36.1	672	650.1
5	161.0	162.0	45.1	46.1	18	18.2	18	34	35.5	626	639.9
6	177.2	176.4	45.0	46.1	18	18.7	18	36	33.3	631	600.0
7	189.8	190.1	46.9	45.7	14	14.5	14	42	41.7	539	584.3
8	194.0	198.9	50.6	51.1	16	17.2	18	38	40.6	624	731.7
9	189.1	195.5	47.4	48.4	14	13.5	14	45	43.5	622	608.5
10	191.5	193.9	50.4	49.9	16	15.3	16	38	41.3	613	660.8
11	174.5	176.1	43.9	43.2	16	15.9	16	38	38.3	602	612.1
12	151.2	152.3	43.4	41.1	14	13.3	14	28	24.0	341	336.6
13	171.1	164.6	48.6	48.3	14	14.3	14	37	36.9	524	516.0
14	161.3	165.5	48.0	48.7	16	16.5	16	38	38.7	591	619.7
15	165.2	174.0	50.8	51.9	16	16.3	16	35	35.5	551	568.7
16	153.0	156.6	45.2	46.8	14	14.6	14	31	32.3	466	452.3
17	160.5	162.6	45.9	45.2	14	13.5	14	35	34.5	518	483.5
18	173.5	180.7	47.3	47.4	12	11.9	12	41	41.8	517	502.0
19	143.5	148.0	48.9	46.0	16	16.0	16	32	31.1	508	498.2
20	165.2	162.4	47.3	46.1	12	12.3	12	36	37.8	436	453.2

在表1数据的基础上,使用 Microsoft Excel 2016 对数据进行处理,得到了各测量值误差,以及与实际值相比测量值的 t 检验^[23] 概率(显著性水平 $\alpha = 0.05$),其结果如表2所示。

表2 数据分析结果
Tab.2 Results of data analysis

参数	最大误差/%	最小误差/%	平均误差/%	平均测量精度/%	正确率/%	标准差	t 检验分布概率
穗长	5.36	0.11	1.95	98.05	95	0.014 6	0.662 7
穗粗	5.99	0.23	2.01	97.99		0.015 6	0.763 2
穗行数							
行粒数	14.13	0.39	3.71	96.29		0.034 0	0.926 0
穗粒数	17.26	1.29	4.33	95.67		0.036 7	0.851 2

由表2可知,穗长和穗粗平均测量精度不低于97.99%,行粒数平均测量精度为96.29%,穗粒数平均测量精度为95.67%,且和实际值相比,上述参数的 t 检验概率 $P > 0.05$,由此可知其差异无显著性;穗行数因为采用正确率来评价,相比于穗行数平均测量精度低,且穗行数测量的正确性对穗粒数影响较大,另穗行数修正模型对应的行数范围为10~22行,而在测量过程中大多数玉米果穗的穗行数集中在12~18行,通过改变修正模型的行数范围或通过全景图像采集能够提高穗行数测量正确率,进而提高穗粒数检测精度。试验中,玉米果穗机器视觉平均测量速度为600 ms/穗,考种系统测量速度为6 s/穗,能够满足使用要求。

5 结论

(1)通过使用考种设备和机器视觉方法获得玉米果穗单面彩色图像,利用灰度化模型 $|B-R|$ 和 $(G+B)/2$ 将彩色图像进行灰度化,利用改进后

的一维最大熵阈值分割方法对灰度图像进行二值化,分别得到果穗轮廓二值图像和果穗特征二值图像。

(2)通过轮廓二值图像计算果穗放置后的倾斜角,实现果穗轮廓二值图像和果穗特征二值图像的自动纠偏,为后续测量的准确性提供保障。

(3)通过提取局部特征二值图像,利用水平扫描获取穗行宽度,通过穗行数修正模型得到果穗的穗行数;通过提取局部单行籽粒特征二值图像,利用垂直扫描得到行粒数;通过穗行数和行粒数得到穗粒数。

(4)试验证明,测量方法对穗长和穗粗的平均测量精度分别为98.05%和97.99%,穗行数测量正确率为95%,行粒数平均测量精度为96.29%,穗粒数平均测量精度为95.67%,和实际值相比,穗粗、穗长、行粒数及穗粒数的测量值的 t 检验分布概率 $P > 0.05$,其差异无显著性,玉米果穗平均测量速度为600 ms/穗,考种系统测量速度为6 s/穗以内,能够满足考种设备使用需求。

参 考 文 献

[1] 张文英. 农学实验与实习指导[M]. 北京:中国农业出版社,2011.

[2] 林义闽,吕乃光,娄小平,等. 用于弱纹理场景三维重建的机器人视觉系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2):540-549. LIN Yimin, LÜ Naiguang, LOU Xiaoping, et al. Robot vision system for 3D reconstruction in low texture environment[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(2):540-549. (in Chinese)

[3] 吉宏伟,何江萍,杨新. 基于层次上下文活动轮廓的三维CT肝脏图像分割[J]. 生物医学工程学杂志, 2014(2):405-412. JI Hongwei, HE Jiangping, YANG Xin. Three-dimension CT liver image segment based on hierarchical contextual active contour[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2014(2):405-412. (in Chinese)

[4] 王树鹏,陈明,吴广君. 面向互联网的大规模重复图像检索技术研究[J]. 通信学报,2014,35(12):196-202. WANG Shupeng, CHEN Ming, WU Guangjun. Large-scale duplicate image retrieval technical research for the Internet[J]. Journal on Communications, 2014,35(12):196-202. (in Chinese)

[5] 李宗南,陈仲新,王利民,等. 基于小型无人机遥感的玉米倒伏面积提取[J]. 农业工程学报, 2014,30(19):207-213. LI Zongnan, CHEN Zhongxin, WANG Limin, et al. Area extraction of maize lodging based on remote sensing by small unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(19):207-213. (in Chinese)

[6] 邬明权,杨良闯,于博,等. 基于遥感与多变量概率抽样调查的作物种植面积测量[J]. 农业工程学报,2014,30(2):146-152. WU Mingquan, YANG Liangchuang, YU Bo, et al. Mapping crops acreages based on remote sensing and sampling investigation by multivariate probability proportional to size[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(2):146-152 (in Chinese)

[7] 李景彬,陈兵旗. 棉花铺膜播种机导航路线图像检测方法[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(1):40-45. LI Jingbin, CHEN Bingqi. Image detection method of navigation route of cotton plastic film mulch planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 40-45. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140107&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.007. (in Chinese)

[8] 贾伟宽,赵德安,阮承治,等. 苹果采摘机器人夜间图像降噪算法[J]. 农业工程学报,2015,31(10):219-226.

- JIA Weikuan, ZHAO Dean, RUAN Chengzhi, et al. De-noising algorithm of night vision image for apple harvesting robot[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 219 – 226. (in Chinese)
- [9] 温芝元, 曹乐平. 柑桔果实病虫害的傅里叶频谱重分形图像识别[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 159 – 165. WEN Zhiyuan, CAO Leping. Citrus fruits diseases and insect pest recognition based on multifractal analysis of Fourier transform spectra[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 159 – 165. (in Chinese)
- [10] 王海超, 高雄, 陈铁英, 等. 农作物病害检测中光谱和图像处理技术现状与展望[J]. 农机化研究, 2015, 37(10): 1 – 7. WANG Haichao, GAO Xiong, CHEN Tieying, et al. Research progress and prospect of spectral and machine vision technology on crop disease detection[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(10): 1 – 7. (in Chinese)
- [11] 吕永春, 马钦, 李绍明, 等. 基于背景板比例尺的玉米果穗图像特征测量[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 43 – 47. LÜ Yongchun, MA Qin, LI Shaoming, et al. Image features measurement of maize ear based on background plate scale[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 43 – 47. (in Chinese)
- [12] 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 CSAE, 2014, 30(6): 131 – 138. (in Chinese)
- [13] 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. 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. http://www.jcsam.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. (in Chinese)
- [14] 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. 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. http://www.jcsam.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. (in Chinese)
- [15] 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 CSAE, 2015, 31(3): 221 – 227. (in Chinese)
- [16] 王传宇, 郭新宇, 吴升, 等. 采用全景技术的机器视觉测量玉米果穗考种指标[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 155 – 162. WANG Chuanyu, GUO Xinyu, WU Sheng, et al. Investigate maize ear traits using machine vision with panoramic photography[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24): 155 – 162. (in Chinese)
- [17] 杜建军, 郭新宇, 王传宇, 等. 基于分级阈值和多级筛分的玉米果穗穗粒分割方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 140 – 146. DU Jianjun, GUO Xinyu, WANG Chuanyu, et al. Segmentation method for kernels of corn ear based on hierarchical threshold and multi-level screening[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(15): 140 – 146. (in Chinese)
- [18] KANTIP K, WASIN S. Color and texture for corn seed classification by machine vision[C]//Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS), 2011: 7 – 9.
- [19] 宋鹏, 张晗, 罗斌, 等. 基于多相机成像的玉米果穗考种参数高通量自动提取方法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 181 – 187. SONG Peng, ZHANG Han, LUO Bin, et al. High throughput automatic extraction method of corn ear parameters based on multiple cameras images[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 181 – 187. (in Chinese)
- [20] 吴刚, 陈晓琳, 谢驾宇, 等. 玉米果穗自动考种系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 433 – 441. WU Gang, CHEN Xiaolin, XIE Jiayu, et al. Design and experiment of automatic variety test system for corn ear[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 433 – 441. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s066&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. S0. 066. (in Chinese)
- [21] 张帆, 李绍明, 刘哲, 等. 基于机器视觉的玉米异常果穗筛分方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 45 – 49. ZHANG Fan, LI Shaoming, LIU Zhe, et al. Screening method of abnormal corn ears based on machine vision[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 45 – 49. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S008&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. S0. 008. (in Chinese)
- [22] 吴刚, 谭戔, 郑永军, 等. 基于机器视觉的谷物联合收获机行走目标直线检测[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 266 – 270. WU Gang, TAN Yu, ZHENG Yongjun, et al. Walking goal line detection for grain combine harvester based on machine vision[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 266 – 270. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s55&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2012. S0. 055. (in Chinese)
- [23] 刘双喜, 孙林林, 付千悦, 等. 单粒谷物体积排液法精确测量研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 36 – 42. LIU Shuangxi, SUN Linlin, FU Qianyu, et al. Accurate measurement of single grain volume draining method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 36 – 42. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180304&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 03. 004. (in Chinese)