

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.009

基于深度相机的玉米株型参数提取方法研究*

宗泽^{1,2} 郭彩玲¹ 张雪¹ 马丽¹ 刘刚¹ 弋景刚²

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 河北农业大学机电工程学院, 保定 071000)

摘要: 提出了一种基于骨架提取的改进算法,可实现在大田环境下,使用PMD深度相机快速、无损测量玉米株型参数。首先利用深度图像RGB伪彩色和深度距离信息,提取深度图像的骨架,排除复杂背景干扰,得到单株玉米的二值骨架图像;然后利用基于角点检测的改进归类算法提取骨架图像特征点;最后建立骨架图像中特征点与深度图像的对应关系,利用空间几何数学方法,结合特征点计算出玉米的3种株型参数,即株高、茎粗、叶倾角。农田实验对比分析表明,所提方法的株高测量结果与人工测量结果的相关系数 r 为0.986,最大相对误差小于2 cm,农田作物育种抗逆性分析还表明玉米株型参数与抗倒伏性具有显著相关性。

关键词: 玉米 抗倒伏性 TOF相机 深度图像 株型参数

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)S0-0050-07

Maize Plant Type Parameters Extraction Based on Depth Camera

Zong Ze^{1,2} Guo Cailing¹ Zhang Xue¹ Ma Li¹ Liu Gang¹ Yi Jinggang²

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Mechanical and Electrical Engineering College, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China)

Abstract: During the whole crop growing period and high-precision breeding process, measuring crop plant type parameters to achieve its phenotypic analysis is one of the important link. In view of the problem that the maize plant type parameters are obtained mainly by artificial field measurement in China at present, and it is high labor intensity and time-consuming. Thus a rapid and nondestructive measurement method of maize plant type parameters was proposed based on the photonics mixer device (PMD) camera with improved skeleton extraction algorithm. Firstly, the RGB pseudo color depth and distance information of depth image were used, and the depth of the image skeleton extraction was obtained by the improved skeleton extraction algorithm without complex background interference. Secondly, the binary skeleton image per corn plant was got by taking advantage of the improved corner detection classification algorithm for extracting skeleton image feature points. Finally, the feature points in the skeleton image were corresponded with depth images. Three kinds of corn plant type parameters: plant height, stem diameter and leaf angle were calculated by using mathematics method combined with space geometry feature point. Field test of the method in the practical application environment showed that the plant height could be measured at the seedling stage of maize plant, the correlation coefficient (r) of maize plant type parameters between the measured results by using the proposed method and the results measured artificially was 0.986, and the maximum relative error was less than 2 cm. Farmland crops breeding resistance analysis also showed that maize plant type parameters and lodging resistance had

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2015-11-16

*北京市科技计划资助项目(D151100004215002)

作者简介: 宗泽, 硕士生, 主要从事自动化与信息化技术研究, E-mail: doctorzong@163.com

通讯作者: 刘刚, 教授, 博士生导师, 主要从事电子信息技术在农业中的应用研究, E-mail: pac@cau.edu.cn

significant correlation. The results provide technical support for the inversion of phenotypic analysis of crop breeding.

Key words: Maize Lodging resistance Time of flight camera Depth image Plant type parameters

引言

玉米株型参数对作物的表型分析^[1]和抗逆性预判^[2]具有极其重要的作用,因此,株型参数的测量是作物精确化育种研究过程中的重要环节^[3]之一。而目前我国田间玉米株型参数的测量主要以人工测量为主,劳动强度高,费时费力。

快速、高通量、无损测量作物性状的方法一直是作物精确化育种领域所研究的热点^[4]。尹英杰等^[5-6]使用单目视觉系统获取图像,提取玉米图像的骨架,计算得到叶倾角、叶向值等叶片形态特征,但是不能得到被测物体的三维坐标,无法保证每幅图像都是植株形态的正投影,给后续测量与分析带来了不可避免的误差;马彦平等^[7-8]基于双目立体视觉重建3D株型,应用空间解析几何原理对株型参数进行测量,以数字图像处理技术对双目图像处理,经过摄像机的标定,测量玉米的株高信息,不足之处在于该方法离不开辅助设施的标定。Stefan Paulus^[9]提出了基于3D激光扫描^[10]的高精度植物株型参数测量方法,但是点云计算量大,耗时间长。

本文以苗期的4个品种玉米为研究对象,以玉米作物的株高、茎粗、叶倾角3个参数为测定指标^[11-13],基于飞行时间(Time of flight, TOF)技术^[14]研究玉米株型参数无损测量方法。在自然条件下获取玉米植株的深度信息,将植株三维空间信息的测量转换为二维图像处理,基于改进的骨架提取和角点检测算法,以实现在大田环境下玉米株型参数的快速、无损测量。

1 实验材料与方法

1.1 实验数据获取

PMD (Photonics mixer device) 摄像机^[15]是近年来研制的一种基于TOF技术的测量物体深度(距离)信息的新型相机,其标准测量距离为0.3~7.0 m,依据被测物体距离镜头的远近,能够有效地去除测量范围外其他复杂干扰物如树木及天空等的影响。

中国农业大学上庄实验站有3块12 m×20.4 m的土地,分批次在2015年5月23日、5月31日、7月1日播种,每次同时播种4个品种的玉米,每4行玉米1个品种,分别是京农科、先玉、郑单、农大4个品种,种植成40株×32行的矩阵,即行间距0.6 m,

每行玉米的株间距为0.3 m,共3840株玉米样本。每块地的玉米种植分布如图1所示。

图像采集设备为PMD Technologies公司的PMD Camcube3.0型深度摄像机。拍摄深度图像的方式如图2所示。

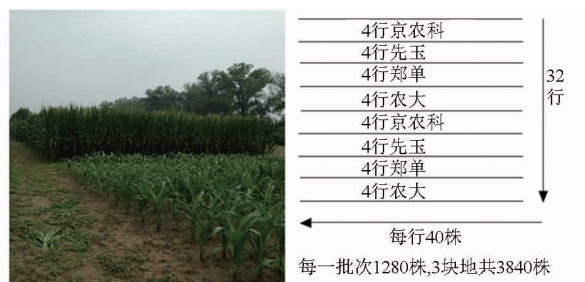


图1 玉米种植分布示意图

Fig. 1 Cornplanting distribution diagram

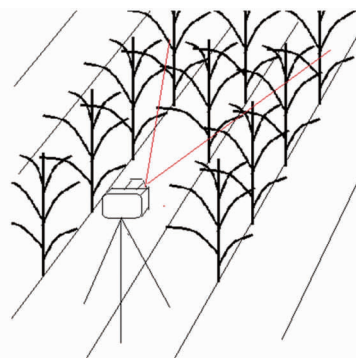


图2 PMD拍摄示意图

Fig. 2 Way of shooting corns by PMD

在大田环境不同光照条件下,即在顺光、逆光、晴天、阴天条件下,拍摄的深度图像如图3所示,没有明显区别。

如图3所示,不同光照条件下,得到的深度图像经实验验证,不会对本文的株型参数提取过程和结果造成影响。

经过实验验证,在距离被测玉米植株2~3 m距离时,拍摄的深度图像画面较清晰且图像无效点较少。选取样本时,排除边界行的玉米,随机选取了苗期4个品种的玉米样本,使用PMD深度相机获取了200像素×200像素的深度图像并记录相机与样本间的测量距离,同时按照农学育种专家的指导,以人工测量的方式和相关标准采集了玉米样本的各项株型参数并记录。累积多次实验共获取了342株×4品种即1368幅深度图像。获取的玉米样本深度图像如图4所示。

图像的深度数据均以浮点型数组^[12]的形式保

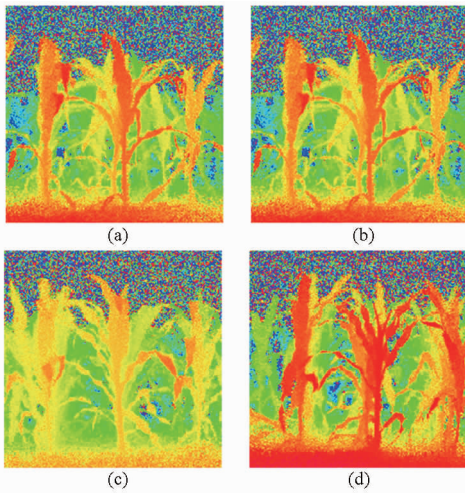


图3 顺光、逆光、晴天、阴天4副图像

Fig.3 Images of front light, backlight, sunny and cloudy days

(a) 晴天 (b) 阴天 (c) 顺光 (d) 逆光

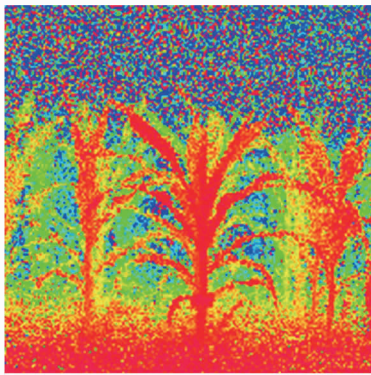


图4 深度图像

Fig.4 Depth image

存在数组中,在设备内置软件中用对数非线性映射变换的方法将其转换成灰度数据 $[0, 255]$,然后进行不同灰度对应的颜色变换,在RGB空间对其进行伪彩色赋值。因此可以根据深度图像的伪彩信息初步去除背景复杂的干扰。

1.2 玉米株型参数测量方法

1.2.1 玉米参数测量流程图

通过改进的骨架提取算法提取深度图像的骨架,排除复杂背景干扰,得到单株玉米的二值骨架图像;然后利用改进的骨架角点检测归类算法对骨架图像提取特征点。最后,将骨架图像中得到的特征点与深度图像对应,利用空间几何数学结合特征点计算出玉米3种株型参数:株高、茎粗、叶倾角。玉米参数测量流程图如图5所示。

1.2.2 改进的骨架提取算法

针对农田的复杂环境以及群体样本间的相互干扰,提出了一种基于深度图像的改进骨架提取算法,旨在对群体样本的深度图像可以有效去除背景的干扰杂物,进而提取骨架。

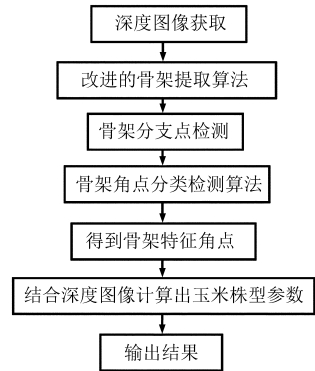


图5 玉米参数测量流程图

Fig.5 Flow chart of corn parameters measurement

先利用颜色直方图确定深度图像中玉米植株的伪彩RGB空间分布,确定颜色阈值,在深度图像中得到一个相对精确的作物颜色分布区间。利用颜色阈值对获取的深度图像进行RGB颜色阈值分割,得到二值图像,然后根据被测玉米样本距PMD镜头的水平距离,对二值图像进行深度阈值分割,排除复杂背景干扰,得到被测玉米的单株二值图像。最后将图像单像素细化得到骨架点,进一步形成玉米的二值骨架图像。

基于深度图像的骨架提取方法流程如图6所示。

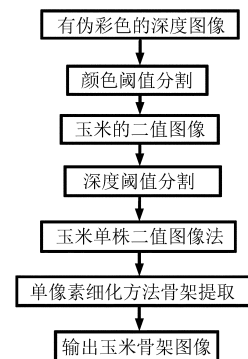


图6 骨架提取方法流程图

Fig.6 Flow chart of skeleton extraction method

1.2.3 角点检测的改进分类算法

因为Harris是一种基于灰度信息的角点检测算法^[16],对于得到的二值深度图像并不适用,所以本文提出一种基于模板角点检测的改进分类算法,使原本用于灰度图像检测的模板角点检测算法可以对二值图像实现角点检测。

首先找出在骨架二值图像中常出现的玉米叶倾角顶点以及叶片末端点,分析其骨架角点类型,根据角点类型设计出适合玉米骨架图像的模板,用二进制编码所有 3×3 的8邻域模板,1代表白色,0代表黑色,模板举例如图7所示,可编码为010011010,然后逐点移动,在每一个 (x, y) 点,根据角点响应函数来判断该点是否为玉米骨架图像的角点,对应模

板归类记录其角点类型。

角点响应函数为

$$R(x, y) = W_8 \& Z_8 + W_7 \& Z_7 + \dots + W_0 \& Z_0 \quad (1)$$

其中 $\&$ 为“与”运算求和, Z_n 为 1 或 0, 对应该点的二值图像像素值, W_n 是模板系数, 与编码相对应, R 是角点响应函数值, R 越大即相似性越高, 当 $R = 9$ 时, 该点判断为角点。

提出的角点检测分类算法流程图如图 8 所示。

0	1	0
0	1	1
0	1	0

图 7 深度图像二值化完全去噪

Fig. 7 Completely denoising of depth images

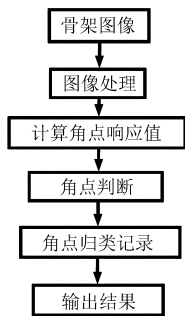


图 8 角点检测分类算法流程图

Fig. 8 Flow chart of corner detection algorithm and classification

该算法计算结果是检测出玉米骨架图像中的叶倾角角点和叶片末端点, 归类并标记叶倾角的角点为红色, 叶片的末端点为绿色。

1.2.4 计算玉米株型参数提取值

利用玉米骨架图像检测出的特征点与深度图像对应, 结合空间几何数学与特征点计算出玉米 3 种株型参数: 株高、茎粗、叶倾角的提取值, 旨在利用提取值与实际测量值理论上具有的相关性, 结合部分人工测量的实际值, 找到两者之间的回归方程, 并期望能够据此由玉米图像提取值得到实际测量值。

(1) 株高

在骨架图像中, 由角点检测算法得到坐标最高点与最低点, 根据像素坐标, 由骨架图像中的特征点对应深度图像中的像素点, 得到特征点的实际空间三维坐标, 计算两点间的实际空间距离。

株高测量原理如图 9 所示。

因两点在同一坐标系内

$$f(x) = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \quad (2)$$

$$F(x) = af(x) + b \quad (3)$$

式中 a ——回归系数 b ——常数

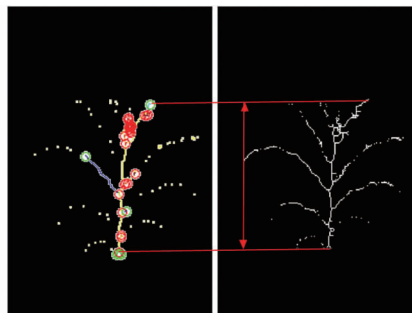


图 9 株高测量原理

Fig. 9 Plant height measuring principle

$f(x)$ ——空间两点间的距离, 株高提取值

$F(x)$ ——株高的人工实际测量值

(2) 茎粗

找到以相邻两红色角点为端点的线段中点, 过该点作水平线, 对应深度二值图像中与茎秆相交的两点, 两点间对应的实际距离即茎粗提取值。

茎粗测量原理如图 10 所示。

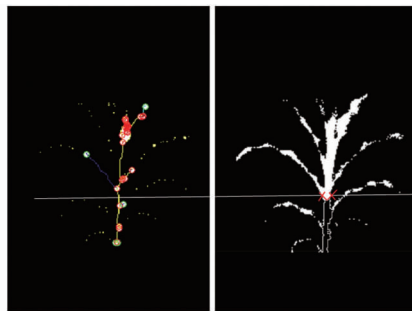


图 10 茎粗测量方法

Fig. 10 Stem diameter measuring method

(3) 叶倾角

在骨架角点检测图中, 以茎秆上的角点 A 、 B 连接成线段, 距离线段 AB 最近的角点 C 为第 3 个点, 对应深度信息得到 3 点的空间三维坐标, 建立空间三角形, 如图 11 所示, 计算得叶倾角 θ 提取值。

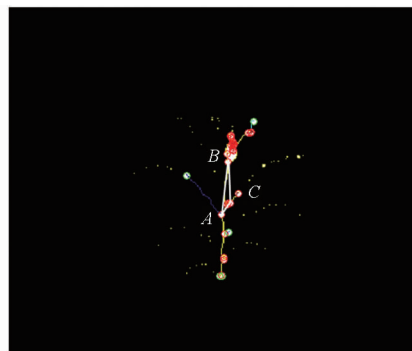


图 11 叶倾角测量方法

Fig. 11 Leaf angle measurement method

$$\theta = \arccos \frac{f^2(x_{AB}) + f^2(x_{AC}) - f^2(x_{BC})}{2f(x_{AB})f(x_{AC})} \quad (4)$$

式中 $f(x_{AB})$ 、 $f(x_{AC})$ 、 $f(x_{BC})$ ——空间三角形 ABC 的三边长度

θ ——叶倾角提取值

2 实验与结果分析

为了验证基于深度相机的深度图像处理以及参数测量方法的可行性,本文进行了玉米深度图像骨架提取与二值图像角点检测归类算法实验验证,并计算了株型参数株高提取值测量。实验获取的深度图像如图 12 所示。以人工测量值为比较对象,验证了本文参数测量方法的准确性。

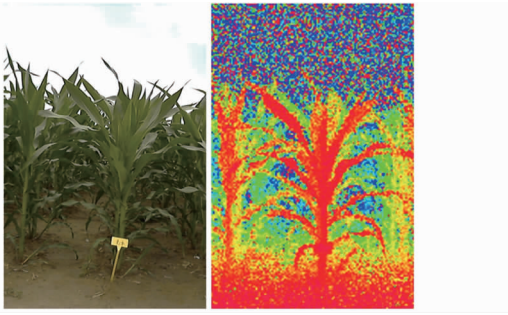


图 12 群体深度图像

Fig. 12 Depth images of group

2.1 图像处理结果与分析

先截取玉米深度图原图的红色主体部分来分析颜色直方图分布,得到一个相对精确的红色分布区,确定 RGB 颜色阈值为:

R 分量

$$R(i, j) = 255$$

G 分量

$$0 \leq G(i, j) \leq 64$$

B 分量

$$0 < B(i, j) < 65$$

由玉米和 PMD 深度相机间测量距离,得深度阈值为(2.658, 2.979),最后利用改进的角点检测归类算法得到玉米骨架的特征角点。输出结果如图 13 所示。

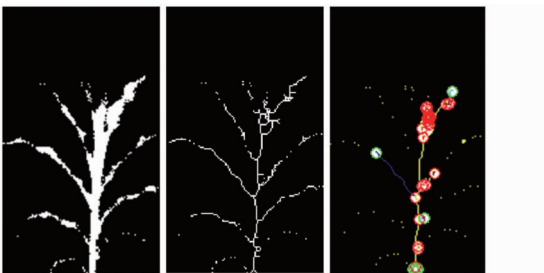


图 13 骨架提取、角点检测输出结果

Fig. 13 Output of skeleton extraction and corner detection

从图 13 可以看出,改进的骨架提取算法有效地去除了复杂背景干扰,尤其是群体样本间的干扰,得到了单株玉米的二值图像,提取了玉米的骨架图像;从红色标记看出,改进的骨架角点检测分类算法对

于叶倾角角点的检测分类效果很好,而对于叶片末端的角点检测效果不理想,这是因为深度图像的不完整导致叶片的骨架有多处断点,所以叶片末端的角点检测被判断为骨架断点处。

2.2 图像测量结果的准确性验证

以人工测量值为标准,从实验数据中选取 170 幅苗期玉米的深度图像,以图像处理得出的参数提取值为自变量,人工测量值为因变量做相关与回归分析,通过相关性分析,得到结果株高的相关系数 r 为 0.986,如表 1 所示。

表 1 提取值与测量值的相关性

Tab. 1 Correlation of extracted and measured values

		提取值	测量值
提取值	相关系数	1	0.986 **
	显著性(双侧)		0
测量值	相关系数	0.986 **	1
	显著性(双侧)	0	

提取值与测量值呈正相关,在 $\alpha = 0.01$ 的置信水平下极显著相关,说明两者之间存在一定的数学关系,可以使用 SPSS 软件,通过回归分析利用数学模型建立起反映实际情况的数量关系,如表 2~4 所示。

表 2 模型汇总

Tab. 2 Model summary

模型	R	R ²	调整 R ²	标准估计误差/cm
1	0.986	0.973	0.971	1.612 63

表 2 是对回归方程拟合情况的描述,可知决定系数 R^2 越大,模型效果越好。株高提取值的相对误差控制在 2 cm 以内。

表 3 对回归方程的方差分析

Tab. 3 Analysis of variance for regressed equation

模型	平方和	自由度	均方	F 值	显著性
回归	1 395.462	1	1 395.462	536.595	0
残差	39.009	15	2.601		
总计	1 434.471	16			

表 3 对模型进行方差分析,结果为 $F = 536.595$,显著性检验 $P = 0$,提示模型具有统计学意义。

表 4 回归系数及其显著性检验结果

Tab. 4 Regression coefficients and significance test results

模型	非标准化系数		标准系数	t 值	显著性
	B	标准误差			
常量	20.759	3.536		5.870	0
提取值	0.906	0.039	0.986	23.165	0

表 4 给出了回归方程中常数项、回归系数的估计值和检验效果, $a = 0.906$, $b = 20.759$,得到回归方

程: $F(x) = 0.906f(x) + 20.759$ 。对回归系数的检验拒绝了原假设,认为自变量对因变量的影响确实存在。

同样,可以得出茎粗的提取值与测量值的相关系数是 0.318,两者不相关。其原因示意图如图 14 所示。

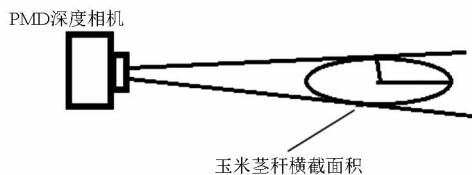


图 14 茎粗测量误差

Fig. 14 Stem diameter measurement error

如图 14 所示,因为拍摄角度以及玉米茎秆横截面是不规则的椭圆形,拍摄到的 PMD 图像所包含的茎秆信息是拍摄面投影,由此可能会小于实际茎粗。因而造成测得的茎粗信息与人工实际测量值差别较大,相关性很差。

因为玉米品种的原因,同一生长期同一批次的每个品种的玉米叶倾角基本相等,如先玉叶倾角 20° ,京农科 15° ,农大 20° ,郑单 25° ,因为因变量固定,所以提取值与测量值不具备相关性,叶倾角提取值的最大相对误差是 1.5° ,所以不影响依据夹角对不同品种玉米的判别。

综合实验结果,通过本文方法测量的玉米株型参数,其测量精度可以实现对玉米作物的表型分析,用于后续对同一生长期不同品种玉米的分类以及长势判断等。

2.3 对作物育种抗逆性的预判

李得孝^[2]研究指出,玉米植株的茎粗、株高,尤其是茎粗与玉米的倒伏性具有极显著正相关 ($R = 0.4419$),且与产量显著正相关 ($R = 0.2879$),所以茎秆的粗细与产量不存在矛盾关系。因此,从实际

应用角度出发,通过 PMD 无损测量的方式采集玉米的株型参数,对于预判玉米品种抗倒伏性,保证玉米作物产量,以及育种培养等具有重要意义。而 2015 年 7 月 14 日大风过后的玉米倒伏现场,每个品种的玉米倒伏比例更加验证了这点。玉米大田倒伏现场如图 15 所示。



图 15 玉米倒伏现场

Fig. 15 Scene of lodging maize field

3 结论

(1) 利用深度图像,通过去噪处理、骨架提取和角点检测归类算法,提出的玉米株型参数提取方法应对排列规则的群体样本,可以排除复杂背景的干扰,能够有效地无损测量株高和叶倾角。

(2) 经过实验验证和线性回归分析,提出的方法可以将苗期玉米的株高参数提取值的相对误差控制在 2 cm 以内,而叶倾角提取值的最大相对误差为 1.5° ,综合实验结果表明本文的株型参数测量思路对于生长良好的苗期玉米具有很好的测量效果,可以为反演作物育种表型分析提供技术支持。

(3) 目前本文的株型参数提取方法只能适用于大田环境下生长良好、排列规则的苗期玉米,对于叶片弯折等非正常生长状态的玉米,参数测量效果还不理想,对于复杂环境下多生长期、多形态的玉米株型参数无损测量需要进一步研究。

参 考 文 献

- 1 马娟. 玉米主要株型性状的主基因+多基因遗传模型分析[D]. 新乡:河南科技学院,2012.
Ma Juan. Analysis on maize plant type via mixed inheritance model of major genes plus polygenes[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- 2 李得孝. 玉米抗倒性指标及其遗传研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2001.
Li Dexiao. Indexes and their heredity analysis on lodging resistance of corn [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2001. (in Chinese)
- 3 危扬. 基于光模型的高产作物株型量化设计研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2014.
Wei Yang. A research for plant type quantitative design of high-yield crop based on light model [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014. (in Chinese)
- 4 孟令帅. 便携式田间信息采集处理终端研发[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014.
Meng Lingshuai. Research and development of portable field information collection and processing terminal [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
- 5 尹英杰,徐德,张正涛,等. 基于单目视觉的平面测量[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(4):347-352.

- Yin Yingjie, Xu De, Zhang Zhengtao, et al. Plane measurement based on monocular vision [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, 27(4): 347–352. (in Chinese)
- 6 杨鑫,马斌,王健生,等. 基于单目视觉的矿井机车障碍物检测和测距方法[J]. *工矿自动化*, 2014, 40(11): 96–99.
Yang Xin, Ma Bin, Wang Jiansheng, et al. Obstacle detection and ranging method of mine locomotive based on monocular vision [J]. *Industry and Mine Automation*, 2014, 40(11): 96–99. (in Chinese)
- 7 马彦平. 基于数字图像的冬小麦、夏玉米长势远程动态监测技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
Ma Yanping. Research on the remote and dynamic monitoring technology for winter wheat and summer corn growth condition based on digital image [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- 8 王传宇,郭新宇,肖伯祥,等. 玉米叶片生长状态的双目立体视觉监测技术[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(9): 268–273.
Wang Chuanyu, Guo Xinyu, Xiao Boxiang, et al. Maize leaf movement monitoring base on binocular stereo vision [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9): 268–273. (in Chinese)
- 9 Stefan Paulus, Henrik Schumann, Heiner Kuhlmann, et al. High-precision laser scanning system for capturing 3D plant architecture and analysing growth of cereal plants[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 121(5): 1–11.
- 10 冯亚飞,陈云波,张河坤,等. 三维点云数据在历史建筑结构分析和尺寸量测中的应用[J]. *地矿测绘*, 2015, 31(2): 4–8.
Feng Yafei, Chen Yunbo, Zhang Hekun, et al. Application of 3D point clouds in structure analysis and dimension measurement for historical buildings[J]. *Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources*, 2015, 31(2): 4–8. (in Chinese)
- 11 蒋普,耿楠. 基于网络摄像机的株高远程无损测量系统[J]. *农机化研究*, 2015(4): 68–72.
Jiang Pu, Geng Nan. Crop height non-destructive remote measurement based on IP camera [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2015(4): 68–72. (in Chinese)
- 12 丰光,刘志芳,吴宇锦,等. 玉米抗倒性与茎秆穿刺力和拉力关系的初步研究[J]. *玉米科学*, 2010(6): 19–23.
Feng Guang, Liu Zhifang, Wu Yujin, et al. Primary study on correlation between corn variety lodging resistances and its stem puncture-pull strength [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2010(6): 19–23. (in Chinese)
- 13 屈永华,王锦地,董健,等. 农作物冠层结构参数自动测量系统设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(2): 160–165.
Qu Yonghua, Wang Jindi, Dong Jian, et al. Design and experiment of crop structural parameters automatic measurement system [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(2): 160–165. (in Chinese)
- 14 张旭东,李文龙,胡良梅,等. 基于PMD相机的特征跟踪位姿测量方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2013, 27(7): 640–646.
Zhang Xudong, Li Wenlong, Hu Liangmei, et al. Characteristic tracking position and attitude measurement method based on PMD camera [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, 27(7): 640–646. (in Chinese)
- 15 周薇,马晓丹,张丽娇,等. 基于多源信息融合的果树冠层三维点云拼接方法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 193–200.
Zhou Wei, Ma Xiaodan, Zhang Lijiao, et al. Three dimensional point cloud splicing of tree canopy based on multi-source camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 193–200. (in Chinese)
- 16 王启春,郭广礼,查剑锋,等. 基于图像灰度点特征提取算子的比较研究及改进[J]. *大地测量与地球动力学*, 2012, 32(2): 148–154.
Wang Qichun, Guo Guangli, Zha Jianfeng, et al. Comparative study on interest point detect operators based on image's gray and improvement [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(2): 148–154. (in Chinese)