

基于 RGB-D 相机的单株玉米株高测量方法

仇瑞承¹ 苗艳龙¹ 季宇寒¹ 张漫¹ 李寒² 刘刚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. 中国农业大学农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 玉米株高是反映作物长势的重要指标。为了实现田间单株玉米株高的快速测量,提出了一种基于 RGB-D (RGB-Depth) 相机的玉米株高测量方法。以拔节期玉米为观测对象,首先利用 RGB-D 相机获取田间玉米的彩色图像和深度图像。对玉米彩色图像进行灰度化、二值化和去噪处理,提取出包含待测玉米的二值图像。利用改进的分水岭分割算法对玉米的灰度图像进行分割,对分割结果进行圆形拟合操作,定位玉米的中心区域。对玉米的二值图像进行骨架化处理,检测骨架的交叉点和末端点,确定玉米骨架的中心点,并检索其到末端点的最短路径。对各条路径的点云数据进行求差与比较,确定玉米的最高点,并对最高点附近的点云数据进行直方图统计,获得地面点。最后,通过计算玉米最高点和地面点的差值,实现单株玉米株高参数的测量。对玉米样本进行测试试验的结果表明:单株玉米株高的平均测量误差为 1.62 cm,均方根误差 (RMSE) 为 1.86 cm,测量精度满足实用要求。

关键词: 作物表型; RGB-D 相机; 株高; 图像识别; 点云处理

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0211-09

Measurement of Individual Maize Height Based on RGB-D Camera

QIU Ruicheng¹ MIAO Yanlong¹ JI Yuhan¹ ZHANG Man¹ LI Han² LIU Gang²

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

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Plant height is an essential phenotype parameter for assessing plant vigor and estimating plant biomass. In order to rapidly measure individual maize plant height, a method based on RGB-D (red, green, blue-depth) camera was proposed in this paper. Color images and depth images of maize at the jointing stage were captured using RGB-D camera in field. First, the color image of maize was processed by graying and binarizing. Then, morphological open operation was conducted within region of interest, and the largest region of maize image was extracted to remove weed and little leaves. Second, the optimized watershed algorithm was applied to the maize gray image and the boundary was generated, then the circle fitting was carried out for the boundary points. After that, the skeletonization operation was conducted for the maize binary image. There were crossing points at the contact points between leaves, and ending points at the end of leaves. The crossing points and ending points were searched and saved, and the distances between the center of the circle and each crossing point were calculated. Only the crossing point that was nearest to the center of circular was chosen as the maize center. Next, the Dijkstra algorithm was used to find the nearest paths between the maize center and each ending point. The color coordinates of the paths were saved and the corresponding point cloud data were generated based on the mapping relationship between color coordinate, depth coordinate and camera coordinate. Third, the differences between neighbor points of every path were calculated to determine the potential measurement points of the target maize and remove the point cloud data belong to non-target maize leaves. All the paths were compared to find the highest point of maize. The histogram statistic method was

收稿日期: 2017-06-30 修回日期: 2017-11-21

基金项目: 北京市科技计划项目 (D151100004215002) 和国家重点研发计划项目 (2016YFD0200600-2016YFD0200602、2016YFD0300600-2016YFD0300606)

作者简介: 仇瑞承 (1990—), 男, 博士生, 主要从事农业自动化与信息化技术研究, E-mail: qrc@cau.edu.cn

通信作者: 张漫 (1975—), 女, 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: cauzm@cau.edu.cn

applied for point cloud data that were around the highest point of maize to extract ground. Finally, the difference between the highest point of maize and ground was calculated to measure individual maize plant height. Samples were tested to verify the aforementioned method, and the results demonstrate that the method proposed in this paper has a good performance in measuring individual maize plant height. The mean errors and root mean square error (RMSE) of measuring plant height were 1.62 cm and 1.86 cm respectively, indicating that the proposed method can be applied to monitoring plant growth.

Key words: plant phenotyping; RGB - D camera; plant height; image recognition; point cloud processing

引言

株高是作物表型形态学参数的一个重要指标,可以用来判断作物活力,估算作物生物量及产量。株高测量通常由人工使用刻度尺完成,该方法测量效率低,且存在人为误差。为了提高测量效率和精度,有关学者采用彩色相机测量作物株高^[1],但是这种测量需要已知的参考物做标准,难以满足连续测量需求。当前,计算作物冠层与地面高度差的“差分法”被认为是株高测量最有效和精确的方法^[2],通常采用三维系统或者三维传感器来完成测量,包括立体视觉系统、LiDAR 或激光扫描传感器、超声波传感器、深度相机等。

立体视觉系统通过不同角度的拍摄,对作物进行三维重建,计算作物的株高。陈兵旗等^[3]利用2个相机计算出了玉米的株高。JAY 等^[4-5]运用 SfM (Structure from motion) 算法对多帧图像进行处理,测得了玉米、小麦的株高。然而,立体视觉的算法通常较为复杂,耗时较长,且彩色相机对外界光照具有较差的鲁棒性。与立体视觉系统相比, LiDAR 或者激光扫描传感器对田间光照具有较好的适应性,一些研究采用二维或三维激光作为株高测量设备^[6-9]。LiDAR 通过探测传感器与作物和地面的距离测量株高, ANDUJAR 等^[10]研究指出垂直测量可以使得测量精度最高。EHLERT 等^[11-13]利用四线激光测量了玉米和小麦的株高。但是, LiDAR 或激光扫描传感器的价格比较昂贵,且点云数据计算量大。超声波传感器的价格要远远低于 LiDAR 或者激光扫描传感器,也不易受到外界自然条件的影响。SUI 等^[14-15]将超声波传感器安装在车辆上,对棉花的株高进行了探测。CHANG 等^[16]搭建了超声波系统,实现了对蓝莓株高的实时测量。SHARMA 等^[17]对小喇叭口期和大喇叭口期的玉米株高进行了测量。超声波分辨率较低,其数据可实现实时处理。但超声波传感器的测量精度容易受到测量角度的影响。

以 Kinect 为代表的深度相机 (RGB - Depth, RGB - D) 在提供深度信息的同时可以生成深度图

像,在机器视觉测量领域得到了广泛应用^[18-19]。Kinect 价格低廉,对外界的光照变化具有较好的鲁棒性,可以被应用于作物的株高测量研究。GAI 等^[20]以盆栽玉米和西兰花幼苗为测量对象,采用 Kinect 相机计算了单株玉米和西兰花的株高。JIANG 等^[21]采集棉花的多帧深度图像,通过图像拼接和深度数据处理实现了对棉花作物行的群体株高测量。但上述研究以单株或群体作物为测量对象,未对叶片交叉条件下的单株作物开展测量研究。

本文拟以拔节期玉米为观测对象,利用 RGB - D 相机获取叶片交叉条件下玉米冠层的彩色和深度信息,通过对彩色图像和点云数据进行处理,对玉米的交叉叶片进行识别和判断,确定玉米的最高点和地面点,从而实现单株玉米株高的快速测量,为作物表型参数的快速获取提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与设备

选用微软公司生产的 Kinect 2.0 相机作为信息采集设备,用于同时采集玉米的彩色信息 (1 920 像素 × 1 080 像素) 和深度信息 (512 像素 × 424 像素)。在 Windows 8 操作系统下,以 Visual studio 2013 为平台,采用 C# 语言,应用微软公司提供的 Kinect for Windows SDK 2.0 开发包,设计开发田间玉米信息采集软件系统,可对玉米的彩色图像、深度图像及彩色相机和深度相机匹配的数据文件进行定时保存。

试验地点为北京市中国农业大学上庄实验站。试验时间为 2016 年 6 月 19 日 15:00—17:00,玉米品种为农大 84,行间距为 90 cm,株间距为 30 cm,生长期为拔节期,株间叶片出现轻度重叠和交叉。Kinect 相机安装于自主设计的车载平台顶端,如图 1 所示,垂直拍摄玉米,其与玉米冠层顶端的距离约为 70 cm。数据采集过程中,车载平台移动,系统软件进行数据采集。数据采集完成后,人工测量玉米样本的株高用于建模及精度分析。

1.2 单株玉米株高测量方法

对采集的玉米彩色图像和深度数据分别进行处

理,实现单株玉米株高测量,总体流程如图 2 所示。

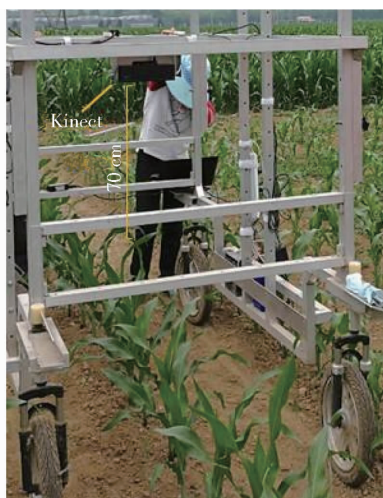


图 1 玉米株高测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of maize plant height measurement

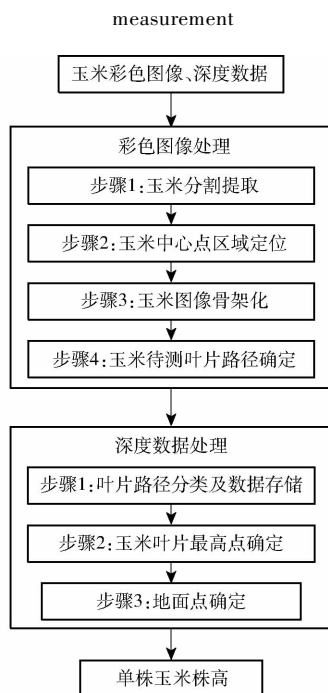


图 2 单株玉米株高测量流程图

Fig. 2 Flow chart of individual maize plant height measurement

彩色图像处理部分主要包括以下 4 个步骤:

步骤 1: 对玉米彩色图像进行灰度化、二值化处理,设定感兴趣区域,将待测玉米从图像中提取出来。并对图像进行去噪处理,剔除地面杂草和玉米零散叶片的干扰,获得包含待测玉米的二值图像。

步骤 2: 选用基于前景标记的分水岭分割算法对玉米的灰度图像进行处理,获得玉米中心区域的分割边界。对分割边界进行圆形拟合操作,该圆形内的区域定位为玉米中心区域。

步骤 3: 对玉米的二值图像进行骨架化处理,包括图像单点细化和去毛刺操作。然后,检测骨架中

的交叉点和末端点,用于判断玉米的中心和叶片的末端。

步骤 4: 应用 Dijkstra 算法搜索玉米中心点到各个末端点的最短路径,并保存路径的彩色图像坐标。

根据获得的待测叶片路径的彩色图像坐标,将其转换为相机坐标系下的点云数据,然后进行深度数据处理,主要包括以下 3 个步骤:

步骤 1: 对玉米待测叶片的各条路径进行分类,将具有相同区域的路径归为一类,并存储其点云数据的深度值。

步骤 2: 比较各类路径的点云数据的深度值,选择距离相机最近的点为玉米最高点。

步骤 3: 对玉米最高点附近的地面点云数据进行直方图统计,个数最多的点确定为地面点。

最后,通过计算玉米叶片最高点和地面点的高度差,获得待测玉米的株高。

2 结果与分析

2.1 玉米分割提取

由于地面光线反射、车载平台及植株阴影的干扰,采用 RGB 颜色空间对玉米彩色图像进行分割容易造成误操作。选用孟庆宽^[22]提出的 C_g 分量作为颜色特征,对玉米进行灰度化处理,其表达式为

$$C_g = 0.422g - 0.299r - 0.144b \quad (1)$$

式中 C_g ——绿色分量与光照强度的差异

g, r, b ——图像中的绿、红、蓝颜色分量

以 C_g 分量为输入量,选用最大类间方差法 (Otsu threshold method, OTSU) 对彩色图像 (图 3) 进行分割。由于 Kinect 采集的玉米彩色图像中的待测玉米位于图像中部,设定了图 4 所示的兴趣区域 (Region of interest, ROI)。只对 ROI 内的彩色图像进行分割处理,以减小车载平台及地面的干扰。



图 3 玉米彩色图像

Fig. 3 Maize color image

对 ROI 内的图像进行二值化处理,玉米叶片的像素点赋值为 1,然后采用形态学“开”操作去除地面杂草和玉米零散叶片的干扰。计算各区域的面积,保留面积最大的区域,获得包含待测玉米的二值

图像,如图5所示。

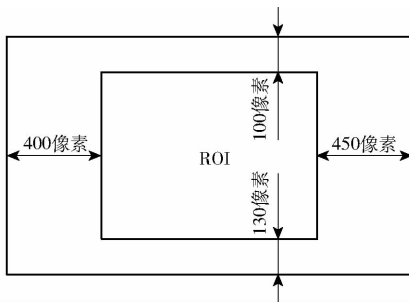


图4 ROI示意图

Fig. 4 Schematic diagram of region of interest



图5 去噪后的二值图像

Fig. 5 Binary image after denoising

2.2 玉米中心点区域定位

玉米中心点附近的叶片为新生叶片,在 C_g 灰度图像中,中心点区域的灰度值要小于周围像素点,基于此特性,选用基于前景标记的分水岭分割算法定位玉米中心点。

首先,将生成的包含待测玉米图像的二值图像与 C_g 灰度图像融合,结果如图6所示。检测二值图像中的像素点,玉米叶片即像素点为1的区域, C_g 灰度图像的灰度保持不变;非玉米区域即像素点值为0的区域, C_g 灰度图像中灰度设为0,以剔除地面、杂草及散乱叶片的干扰。



图6 融合后的灰度图像

Fig. 6 Gray image after fusing

由于玉米中心点区域的灰度值小于周围像素点,所以融合后的灰度图像在该区域存在极小值点^[23]。但是,灰度图像中存在大量微小的局部极小值点,直接应用分水岭分割算法,将会产生许多零散的边界,不能有效获得玉米中心点。本文采用扩展极小运算,对其邻域像素灰度之差小于给定阈值的局部极小值点进行消除。其中,给定

阈值为

$$T_H = 3 \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_{\max}} \text{Max}_i}{N_{\max}} - \frac{\sum_{i=1}^{N_{\min}} \text{Min}_i}{N_{\min}} \right) \quad (2)$$

式中 T_H ——给定阈值

Min_i 、 Max_i ——融合后的灰度图像中的局部极小值点、局部极大值点

N_{\min} 、 N_{\max} ——局部极小值点、极大值点个数

然后,将扩展极小运算后获得的极小值区域应用形态学强制最小运算对融合后的灰度图像进行标记,使图像中的极小值点仅出现在被标记的位置。对标记后的灰度图像应用分水岭分割算法得到闭合的分割边界。

由于玉米叶片重叠交叉,融合后的灰度图像的玉米区域中间可能包含非玉米区域,如图7所示,这种情况会导致分水岭分割后在非玉米区域生成闭合的分割边界。本文通过计算极小值区域的质心坐标,并判断该坐标是否位于闭合的分割边界内,来剔除包含非玉米区域的分割边界,结果如图8所示。



(a) 原始玉米彩色图像



(b) 非玉米区域

图7 非玉米区域示意图

Fig. 7 Schematic diagram of non-maize region

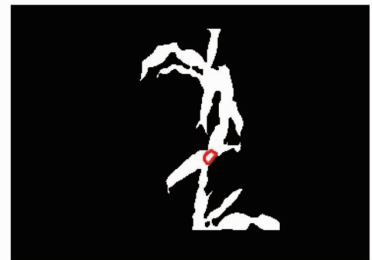


图8 分水岭算法处理结果

Fig. 8 Processing result of watershed algorithm

对包含玉米中心点区域的分割边界进行基于最小二乘法的圆形拟合运算,获得圆心坐标 (X, Y) 、半径 R ,该圆形内的区域即为玉米中心点区域,如图9所示。



图9 分割边界圆形拟合结果

Fig. 9 Circle fitting result of segmented boundary

2.3 图像骨架化

为了实现对玉米叶片的识别和中心点的定位,需提取玉米的骨架,其流程包括3个步骤:图像单点细化、去毛刺、末端点和交叉点检测。

具体操作如下:①对包含待测玉米的二值图像进行单点细化操作获得其骨架。则玉米叶片的末端在骨架中存在对应的末端点,玉米的中心点及叶片的交叉区域在骨架中存在对应的交叉点。②由于玉米冠层叶片较宽,玉米叶片末端部位可能在骨架中存在多个末端点和交叉点,对生成的骨架进行去毛刺操作剔除骨架中微小的分支。③采用 m 邻接性^[24]方法检测骨架中的末端点和交叉点。

计算骨架图像中交叉点与圆心 (X, Y) 的欧氏距离,选取距离图9拟合圆心最近的交叉点作为玉米的中心点 (X_{center}, Y_{center}) ,如图10中的三角形形所示。

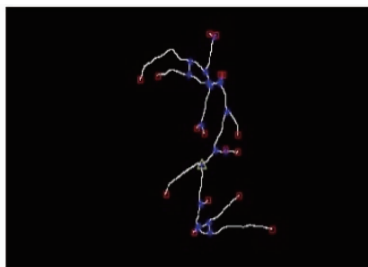


图10 骨架化图像

Fig. 10 Skeletonization image

2.4 玉米待测叶片路径确定

对骨架图像进行处理。以骨架的交叉点为分割点,将玉米骨架划分为多个分段区域,并对各分段区域进行编号。然后,以玉米中心点为起始点,骨架的 num 个末端点为终止点,应用 Dijkstra 算法,搜索起始点到各个终止点的最短路径 $PATH_{num}$,并记录各条路径的分段区域。

每条路径包含有待测玉米的叶片,还可能包含有与其交叉的相邻植株叶片。交叉叶片在重叠边缘会出现高度差,检索最短路径中各点的高度可判断叶片的归属。但是,玉米各层叶片在玉米中心点区域汇聚,该区域同时存在新生叶片,导致玉米中心点附近区域的高度变化剧烈,容易造成误判。

为了解决上述问题,以玉米中心点为圆心,对包

含待测玉米的二值图像进行圆形扫描,检测叶片边缘点,如图11所示,判断该圆形区域内包含的叶片数目 $count$,实现对路径 $PATH_{num}$ 起始端的优化。

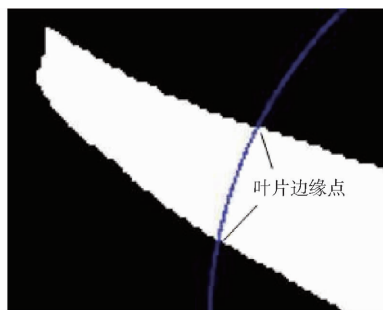


图11 叶片边缘点示意图

Fig. 11 Schematic diagram of leaf edge pixel

算法流程如图12所示。具体操作如下:

(1)初始化作物叶片数量标志 $count = 0$;扫描像素点个数 $total = 300$;扫描初始半径 $R_{test} = R$ 。

(2)以 (X_{center}, Y_{center}) 为圆心, R_{test} 为半径,顺时针方向扫描包含待测玉米的二值图像的 $total$ 个像素点,存储像素点的灰度到数组 $Q(i)$ ($i = 1, 2, \dots, total$) 中。

(3)计算数组 Q 中相邻点之间的差值,存储到数组 $D1(j)$ ($j = 1, 2, \dots, total - 1$) 中。寻找 $D1(j)$ 中的 n 个非零点,并将其对应的 j 值存储到数组 $D2(k)$ ($k = 1, 2, \dots, n$) 中。若 $D1(D2(1)) < 0$,即 $D1$ 中第一个非零点为负值,则 $D2(1)$ 放置 $D2$ 数组末尾,其他 $n - 1$ 个数顺次前移,形成新的数组 $D2(k)$ ($k = 1, 2, \dots, n$);否则,无操作。

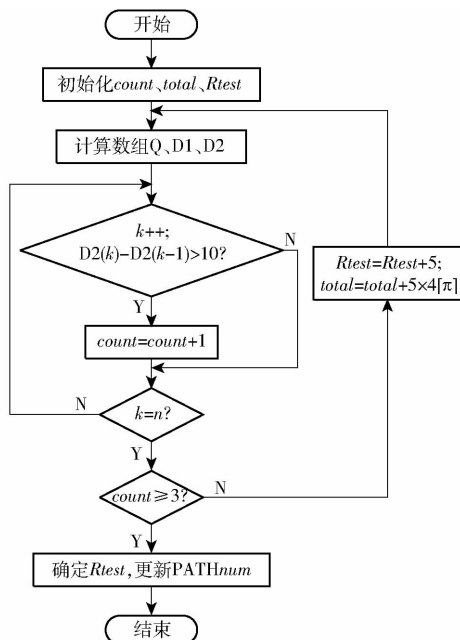


图12 最短路径优化算法流程图

Fig. 12 Flow chart of the shortest path optimal algorithm

(4)计算 $D2(k)$ 与 $D2(k - 1)$ 的差值,其中 $k = 2, 4, \dots, n$ 。判断叶片大小,若 $D2(k) - D2(k - 1) >$

10,即叶片宽度大于10个像素点,则 $count = count + 1$;否则,无操作。

(5)判断 $count$ 。如果 $count < 3$,即该圆内的叶片个数少于3个,则 $Rtest = Rtest + 5$, $total = total + 5 \times \lceil 4\pi \rceil$,返回步骤(2);否则转入步骤(6)。

(6)检测路径 $PATHnum$ 。以 $(Xcenter, Ycenter)$ 为圆心, $Rtest$ 为半径,删除路径 $PATHnum$ 位于该圆内部的像素点,更新路径 $PATHnum$,距离圆心最近的点确定为新的起始点,程序结束。

对图5所示的二值图像,以图10获得的中心点为圆心,进行圆形像素扫描,对各条路径初始端的优化结果如图13所示,获得玉米中心圆形区域。



图13 玉米中心点区域优化

Fig. 13 Optimizing the maize center region

由于 Kinect 相机的彩色图像和深度图像的像素点不是一一对应,为了确保点云数据的完整性和准确性,对路径 $PATHnum$ 进行2个像素点的膨胀处理,得到图14蓝色像素点所示的路径,然后保存各条路径的彩色图像坐标和分段区域编号。



图14 最短路径优化结果

Fig. 14 Results after optimizing the shortest paths

2.5 玉米待测叶片点云数据处理

根据各条路径的彩色图像坐标,转换成相机坐标系下的点云数据^[25]。点云数据存储为*.txt文件,包括相机坐标系下的 x, y, z 和该点云数据对应的彩色图像坐标 x_{color}, y_{color} 。由于 Kinect 相机垂直拍摄玉米,所以相机的 z 轴方向垂直于地面,可表征玉米的深度信息,每条路径的最高点具有最小的 z ,可用于提取玉米株高。

将各条路径点云数据的 z 按照路径起始点到终止点的顺序排列,存储到数组 $POINTnum$ 中。各条路径的点云数据通常位于玉米叶片的中间部位,相邻点云数据之间表征高度的 z 变化不明显,如图15所示。但在叶片交叉重叠的区域,会存在明显的高度差,如图16a、16b所示,可通过检测相邻点云数据之间的差值,对存在突变点的数据进行处理,确定待测玉米叶片的点云数据,如图16c所示。

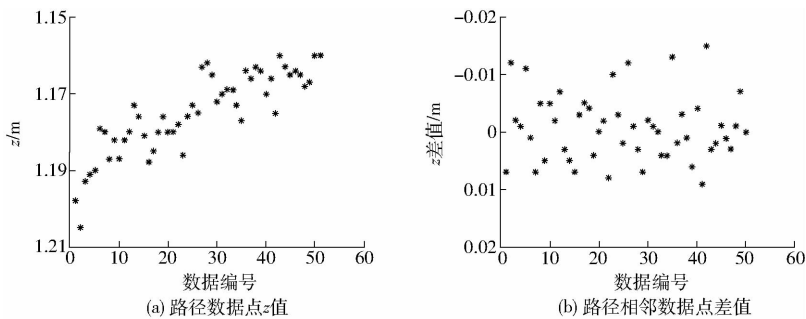


图15 非交叉叶片路径的点云数据 z

Fig. 15 Point cloud data z value of path regarded to the non-contact leaf

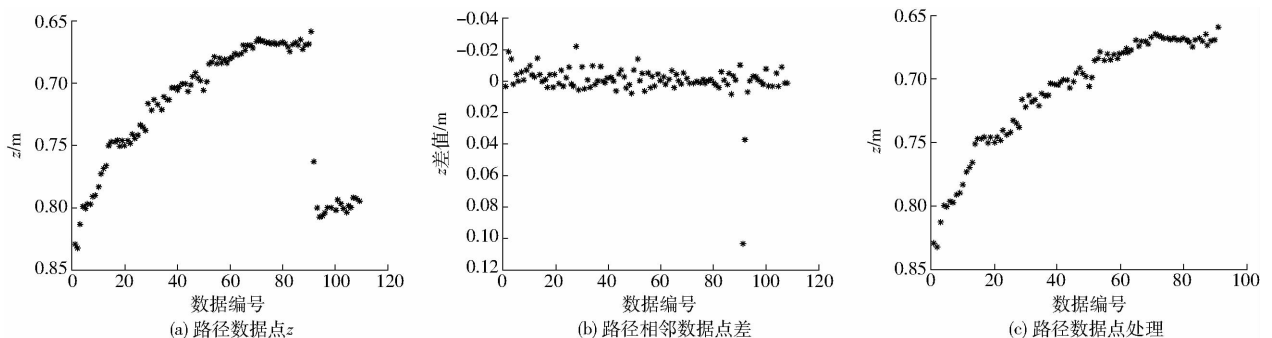


图16 交叉叶片路径的点云数据 z

Fig. 16 Point cloud data z value of path regarded to the contact leaf

点云数据具体处理步骤如下：

首先,将路径进行分类。按照起始点到终止点的顺序对路径的分段区域编号进行排列,并检索各条路径的分段区域编号。具有相同分段区域的路径可能存在同一最高点,故将具有相同分段区域的路径归为一类,并对各条路径按照如表 1 所示的顺序重新进行排列。

表 1 同类路径排序结构

Tab.1 Order structure for the paths in same class

路径	分段区域编号					
A	1	2				
B	1	2	3			
C	1	2	4	5	6	
D	1	2	4	7	8	9
E	1	2	4	7	10	11
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

然后,对同一类的各条路径的点云数据进行检测,获得该类路径的最高点。具体步骤如下：

(1) 初始化路径个数 NUM, 最小值 $MIN = 100$ cm, 分段区域 $zone = 0$, 标记符号 $mark = 0$, 初始检测第 i 条路径, $i = 1$ 。经数据分析和测试, 设定高度差阈值 h 为 4 cm。

(2) 计算第 i 条路径 $POINT_i$ 相邻数据点之间的差值, 存储到数组 $HD(l)$ 中, 其中 l 表示数组 HD 的长度。

(3) 检测 HD 中是否有大于阈值 h 的突变点。若存在, 则寻找第一个满足 $HD(l) > h$ 条件的 l , 删除 $POINT_i$ 中 l 后的数据, 记录突变点 $POINT_i(l)$ 所在的分段区域编号 $zone$, $mark = 1$; 若不存在, 则无操作。

(4) 检测路径数据点 $POINT_i$ 中的最小值 MIN_i , 若 $MIN_i < MIN$, 则更新 $MIN = MIN_i$, 否则, MIN 保持不变。

(5) 检测第 $i + 1$ 条路径的数据点, 若第 i 条路径存在突变点, 且该条路径与第 $i + 1$ 条路径都包含区域 $zone$, 则 MIN 不变, 检测下一条路径, 重复步骤 (5); 否则, $mark = 0$, $zone = 0$, 跳转到步骤 (2)。

(6) 重复步骤 (2) ~ (5), 直至所有路径检测完成, 然后输出 MIN , 即为该类路径的玉米最高点, 程序结束。

算法流程图如图 17 所示。

最后, 对所有路径的点云数据进行处理, 比较所有玉米待测叶片的 z , 确定具有最小 z 的点云数据 Min_z , 即为待测玉米的最高点。

2.6 玉米株高参数提取

根据点云数据 Min_z 在彩色图像中的坐标

(Top_x, Top_y), 确定地面待测量区域的彩色图像坐标范围, 如图 18 虚线框所示, 该范围约为玉米作物行宽度的 1/3。

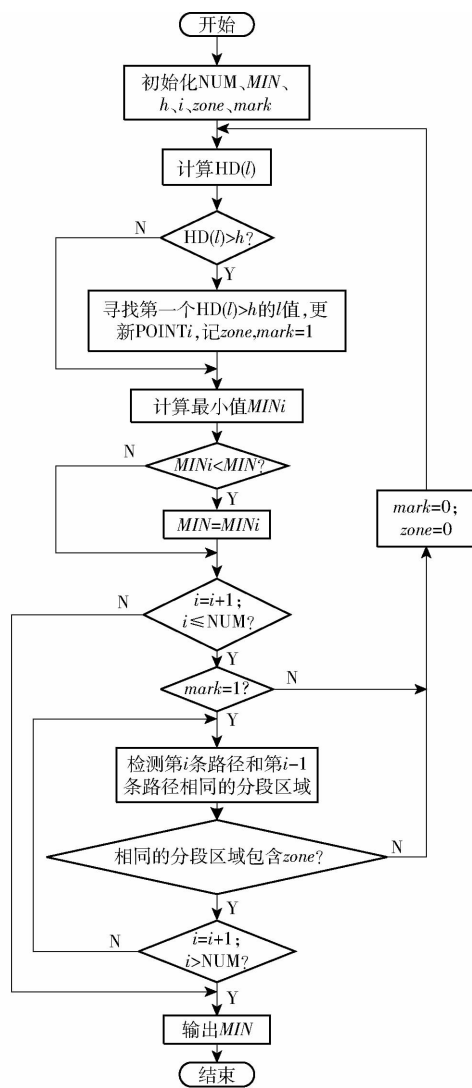


图 17 点云数据处理流程图

Fig. 17 Flow chart of point cloud data processing

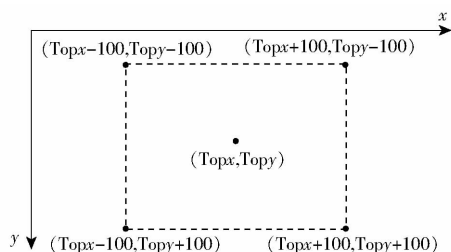


图 18 地面待测量区域示意图

Fig. 18 Schematic diagram of ground potential measuring region

统计二值图像中该部分区域的地面点, 即灰度为 0 的点, 即图 19 中蓝色像素点, 并根据地面点的彩色图像坐标生成地面的点云数据。然后对该部分点云数据的 z 值进行间隔为 1 mm 的直方图统计, 如图 20 所示。其中, 个数最多的 z 确定为地面与相机

的垂直距离 Bottom。

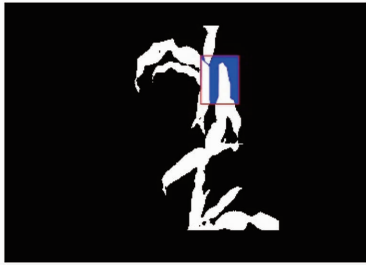


图 19 地面待测量区域

Fig. 19 Ground potential measuring region

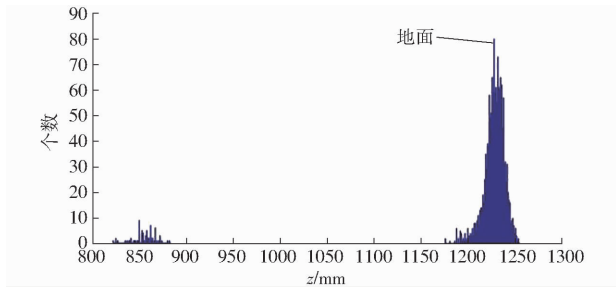


图 20 地面数据点直方图统计

Fig. 20 Histogram statistic of ground point cloud data

计算玉米最高点 $Minz$ 与地面 Bottom 在相机坐标系 z 轴方向的差值,可获得玉米的株高 Height。

2.7 玉米株高测量

对 20 株玉米进行了株高测量试验,以验证本文方法的准确性,结果如表 2 所示。

由试验结果可知,本文提出的方法可以有效地区分交叉叶片,较好地测量玉米的株高参数。玉米株高的平均测量误差为 1.62 cm, RMSE 为 1.86 cm。造成测量误差的主要原因是图像骨架化处理提取得到的玉米叶片点云数据通常位于叶片的叶脉部位,该部位的高度低于叶片边缘,造成玉米最高点测量结果偏小。

对人工测量值和系统测量值进行线性拟合,结果如图 21 所示,决定系数 $R^2 = 0.9869$ 。本文所提出的方法具有较好的株高测量精度,可为玉米的长势监测提供技术支撑。

3 结论

(1) 采用 RGB-D 相机可同时获得玉米的彩色和深度信息,为单株玉米中心点定位和株高测量提供更多依据。

(2) 采用基于前景标记的分水岭分割算法对玉

表 2 玉米株高人工测量与系统测量对比

Tab. 2 Comparison between manual measurement and system measurement in maize height cm

编号	人工测量	系统测量	测量误差
1	46.7	44.9	1.8
2	48.9	47.6	1.3
3	54.8	55.5	0.7
4	54.4	51.8	2.6
5	40.1	40.5	0.4
6	48.9	45.9	3.0
7	55.4	55.1	0.3
8	47.5	45.4	2.1
9	42.0	40.3	1.7
10	40.1	37.9	2.2
11	44.2	42.6	1.6
12	48.2	46.5	1.7
13	57.2	55.7	1.5
14	67.1	65.1	2.0
15	57.5	55.2	2.3
16	37.6	35.3	2.3
17	36.3	35.2	1.1
18	44.6	42.6	2.0
19	40.6	38.3	2.3
20	57.3	55.7	1.6
平均值	48.47	46.86	1.62

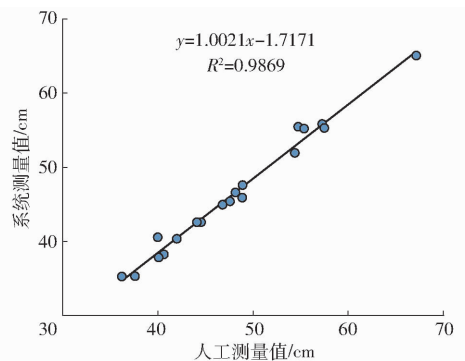


图 21 玉米株高人工测量与系统测量线性拟合
Fig. 21 Linear fitting result of manual measurement and system measurement in maize height

米的彩色图像进行处理,可有效获得玉米的中心区域,定位玉米中心点。

(3) 通过骨架化操作,获得包含待测玉米叶片的各条路径。处理路径所对应的点云数据,分离出待测玉米叶片,计算叶片的最高点与地面点的距离,获得单株玉米高度。

参 考 文 献

- 1 蒋普. 作物长势远程测量关键技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014.
- 2 GRENZDORFFER G J. Crop height determination with UAS point clouds [J]. ISPRS—International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2014, XL-1:135-140.
- 3 陈兵旗,何醇,马彦平,等. 大田玉米长势的三维图像监测与建模[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊1): 366-372.

- CHEN Bingqi, HE Chun, MA Yanping, et al. 3D image monitoring and modeling for corn plants growth in field condition[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(Supp. 1): 366-372. (in Chinese)
- 4 JAY S, RABATEL G, HADOUX X, et al. In-field crop row phenotyping from 3D modeling performed using structure from motion[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 110:70-77.
- 5 HOLMAN F, RICHE A, MICHALSKI A, et al. High throughput field phenotyping of wheat plant height and growth rate in field plot trials using UAV based remote sensing[J]. Remote Sensing, 2016, 8(12): 1031.
- 6 THI P A T, TAKAHASHI K, RIKIMARU A, et al. Method for estimating rice plant height without ground surface detection using laser scanner measurement[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2016, 10(4): 46018.
- 7 FRIEDLI M, KIRCHGESSNER N, GRIEDER C, et al. Terrestrial 3D laser scanning to track the increase in canopy height of both monocot and dicot crop species under field conditions[J]. Plant Methods, 2016, 12:9-23.
- 8 HOFFMEISTER D, WALDHOF G, CURDT C, et al. Crop height variability detection in a single field by multi-temporal terrestrial laser scanning[J]. Precision Agriculture, 2015, 17(2): 296-312.
- 9 WEISS U, BIBER P. Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D LIDAR sensor[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2011, 59(5): 265-273.
- 10 ANDUJAR D, FERNANDEZ-QUINTANILLA C, DORADO J. Matching the best viewing angle in depth cameras for biomass estimation based on poplar seedling geometry[J]. Sensors, 2015, 15(6): 12999-13011.
- 11 EHLERT D, HEISIG M. Sources of angle-dependent errors in terrestrial laser scanner-based crop stand measurement[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 93:10-16.
- 12 SELBECK J, DWORAK V, EHLERT D. Testing a vehicle-based scanning lidar sensor for crop detection[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2010, 36(1):24-35.
- 13 EHLERT D, HEISIG M, ADAMEK R. Suitability of a laser rangefinder to characterize winter wheat[J]. Precision Agriculture, 2010, 11(6): 650-663.
- 14 SUI R, THOMASSON J A, GE Y. Development of sensor systems for precision agriculture in cotton[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2012, 5(4): 1-14.
- 15 SUI R, FISHER D K, REDDY K N. Cotton yield assessment using plant height mapping system[J]. Journal of Agricultural Science, 2013, 5(1): 23-31.
- 16 CHANG Y K, ZAMAN Q U, REHMAN T U, et al. A real-time ultrasonic system to measure wild blueberry plant height during harvesting[J]. Biosystems Engineering, 2017, 157: 35-44.
- 17 SHARMA L K, BU H, FRANZEN D W, et al. Use of corn height measured with an acoustic sensor improves yield estimation with ground based active optical sensors[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 124: 254-262.
- 18 ANDUJAR D, RIBEIRO A, FERNANDEZ-QUINTANILLA C, et al. Using depth cameras to extract structural parameters to assess the growth state and yield of cauliflower crops[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 122: 67-73.
- 19 LI D, XU L, TAN C, et al. Digitization and visualization of greenhouse tomato plants in indoor environments[J]. Sensors, 2015, 15(2): 4019-4051.
- 20 GAI J, TANG L, STEWARD B L. Plant recognition through the fusion of 2D and 3D images for robotic weeding[C]// ASABE Annual International Meeting, New Orleans, 2015.
- 21 JIANG Y, LI C, PATERSON A H. High throughput phenotyping of cotton plant height using depth images under field conditions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 130: 57-68.
- 22 孟庆宽. 基于机器视觉的农业车辆-农具组合导航系统路径识别及控制方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- 23 王传宇, 郭新宇, 肖伯祥, 等. 基于图像拼接的苗期玉米植株缺失数量自动测量方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 148-153.
- WANG Chuanyu, GUO Xinyu, XIAO Boxiang, et al. Automatic measurement of numbers of maize seedlings based on mosaic imaging[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(12): 148-153. (in Chinese)
- 24 郭斯羽, 董红霞, 张翌. 一种用于植物叶片图像骨架提取的去毛刺方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(1): 52-56.
- GUO Siyu, DONG Hongxia, ZHANG Yi. Pruning method for skeletonization of plant leaf images[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(1): 52-56. (in Chinese)
- 25 麦春艳, 郑立华, 孙红, 等. 基于 RGB-D 相机的果树三维重构与果实识别定位[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 35-40. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2015S006&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.006.
- MAI Chunyan, ZHENG Lihua, SUN Hong, et al. Research on 3D reconstruction of fruit tree and fruit recognition and location method based on RGB-D camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 35-40. (in Chinese)