doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.003

基于移动机器人平台的玉米植株三维信息采集系统

李　鹏[1]　劳彩莲[1,2]　杨　瀚[1]　冯　宇[1]

(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. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了快速、无损、自动获取玉米植株的三维信息,设计了一种基于移动机器人平台的玉米植株三维信息采集系统。首先,通过四轮驱动移动机器人与升降平台配合,精准控制 Xtion 深度相机多视角采集盆栽玉米植株的三维点云数据;然后,对获取的点云进行配准拼接与滤波,实现玉米植株的三维重建;最后,对重建后的玉米模型进行叶片的分割与参数测量。该系统的移动机器人运动误差可以控制在 1 cm 之内,玉米植株叶片参数测量误差在 1% ~ 5% 之间,证明了该系统进行玉米植株三维信息采集的可行性。

关键词: 玉米植株; 移动机器人; 三维信息; 信息采集

中图分类号: TP391　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)S0-0015-07

Maize Plant 3D Information Acquisition System Based on Mobile Robot Platform

LI Peng[1]　LAO Cailian[1,2]　YANG Han[1]　FENG Yu[1]

(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 and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Plant 3D information is an important parameter in the process of plant growth, reflecting the normal growth state of plants. In order to quickly and non-destructively acquire the 3D information of corn plants, a 3D information acquisition system based on mobile robot platform was designed. The four-wheel-drive robot was equipped with a lifting platform and Xtion camera at the end, and the Xtion camera acquired a 3D point cloud at multiple angles through the motion control of the robot. Firstly, the hardware structure and software platform of the acquisition system were described. Then, the steering of the four-wheel drive robot simplified the kinematics analysis. According to the system collection needs, the four-wheeled robot and the lifting platform controlled the camera to make a circular motion with a radius of R. The camera collected a 3D point cloud at interval of θ until the robot was moved for one circular motion. Finally, according to the transformation matrix $\boldsymbol{T}$ for calculating the point cloud of the adjacent angle, the registration and splicing of the 3D point cloud were performed, and the filter was used for filtering to complete the 3D reconstruction of the corn. The watershed algorithm was used to mesh and segment the reconstructed maize plants, and the leaf length parameters were measured. The results showed that the motion error for mobile robots was less than 1 cm. The error between predicted value and the true value of the leaf length of corn plant was between 1% and 5%. The system provided a new way for the collection of 3D information of corn plants.

Key words: corn plant; mobile robot; 3D information; information collection

收稿日期: 2019-04-20　修回日期: 2019-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31871527)

作者简介: 李鹏(1994—),男,硕士生,主要从事农业机器人研究,E-mail: 18831631836@163.com

通信作者: 劳彩莲(1966—),女,副教授,博士,主要从事植物信号与信息处理研究,E-mail: laowan@cau.edu.cn

0 引言

植物的三维信息是植物生长发育状态的真实反映,获取植物三维信息方法研究一直是农业数字化和信息化的热门研究方向[1-3]。因此,设计一种快速、无损自动化的植物三维信息采集方法具有重要的意义[4]。

传统的植物三维信息采集方法采用手工接触性采集,操作过程耗时,存在损坏植物、精度低等缺点[5]。而手持激光、视觉传感器的非接触采集方法[6],虽然可以达到无损,但仍存在人为参与、效率低等缺点。针对传统方法存在问题,文献[7-10]中利用电动转台与采集设备配合,通过转盘旋转植物,精准控制旋转角度,获取各个角度植物的三维信息,减少了人为干预,提高了信息采集精度。一些植物的叶片是非刚体,如玉米植株,转台旋转产生的旋转阻力及振动将会引起植物叶片的形变[11],造成采集信息不准确。另外,Xtion、Kinect 等传感器视角范围较小[12-14],在不移动植物的情况下,需要一种自动化、多视角的植物三维信息采集方法[15]。

国内外关于植物自动化三维采集方法研究不多。部分学者通过设计大型的自动化表型采集平台获取植物的三维信息[16];文献[17]在田间建立一个基于激光的表型采集机器人平台;文献[18]利用双目立体视觉系统构建自动化平台,实现了盆栽植物的三维信息采集。但这些平台都存在结构复杂、成本高、不易移动等缺点,限制了其发展前景[19]。机器人技术和 3D 摄像机的进步,为植物三维信息的自动化采集提供了可能[20]。文献[21]利用半自动化的车载 3D 摄像机进行植物的三维信息采集。文献[22]通过四轮高架控制三维激光雷达获取玉米植株的点云信息。文献[23]设计了一种现场自主机器人,配备了成像系统,采集植物形态特征。文献[24]则在此工作的基础上,搭载 3D 飞行光相机进行植物三维信息采集,并将三维信息与实际测量值进行比较。文献[25]将机械臂与激光结合,利用机械臂控制采集激光位姿,多角度获取盆栽植物的三维数据。文献[26]通过机械臂运动,将 3D 飞行光相机定位在不同的视点,获取 3D 点云数据。由于机械臂自身结构限制了作业空间,故仅适合于小型植物的三维信息采集。

本文提出一种室内自动化植物三维信息采集方法,将移动机器人技术与深度相机结合,构建植物三维信息采集系统。该系统由四轮驱动机器人搭载升降平台与视觉传感器组成。通过四轮机器人运动精准控制,调整深度相机的视点,多视角获取植物三维点云。选取盆栽玉米为采集对象,深度相机选择 Xtion 结构光深度相机。在信息采集期间,实现多次访问玉米植株植物,进行快速、无损的玉米三维信息采集。

1 材料和方法

1.1 实验材料

选用的不同生命周期的玉米植株模型,如图 1 所示。利用机器人采集系统对玉米植株进行多次三维数据采集与处理,测量每株玉米的茎高与叶长,并将手工测量值作为参考值。

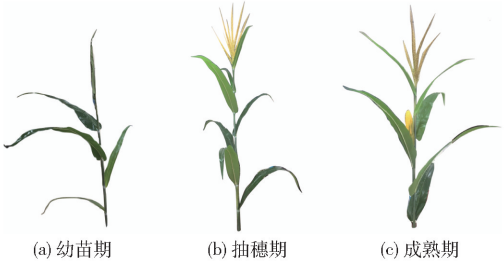


图 1 不同生长周期的玉米植株模型

Fig. 1 Maize plant model with different growth cycles

1.2 信息采集系统的软硬件组成

机器人三维信息采集系统硬件平台如图 2 所示,由四轮驱动机器人底盘、Xtion 深度相机、升降平台、便携式计算机组成。机器人底盘选择四主动轮差动的 Navigator C2 机器人平台,其拥有 4 个直径 262 mm、宽 109 mm 的橡胶充气轮胎,适应各种环境。平台采用整体铝合金铸造成型工艺,负载能力可达 100 kg,并配有独立的伺服驱动器,集成了多种运动控制功能,满足该系统植物三维信息采集作业任务的要求。该系统的三维信息采集设备选取华硕电脑股份有限公司生产的 Xtion PRO 结构光深度相机,其光学元件主要包含红外激光发射器、红外激光接收器和 RGB 摄像头 3 部分。该相机通过红外激光设备获取图像的深度信息,易受光照影响,适合于

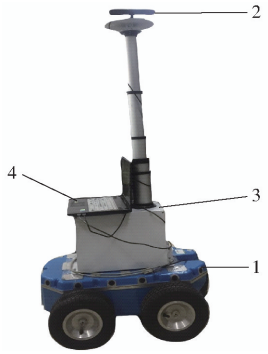


图 2 三维信息采集系统硬件组成

Fig. 2 Hardware components of 3D information acquisition system

1. 移动机器人底盘 2. Xtion 深度相机 3. 升降平台 4. 便携式计算机

室内环境。其有效范围在 0.8 ~ 3.5 m，水平视角是 58°，垂直视角是 45°，分辨率为 320 像素 × 240 像素。升降平台选用竹节式地面电动升降柱，通过电动链条传动，升降高度达 2 m。使用配有英特尔 HD 显卡、4GB 内存、Intel i5 处理器的便携式计算机作为控制和计算的上位机。

该系统的软件在 Windows 操作系统平台下，利用 VS 2013、OpenNI、PCL、Matlab 以及 MDK keil 等工具进行开发。其中 OpenNI、PCL 提供点云处理的接口库。

1.3　信息采集系统构架

机器人三维信息采集系统主要包含 3 个模块：移动机器人及升降平台运动模块、Xtion 深度相机采集模块和玉米植株三维信息处理模块。便携式计算机作为主控模块与接口，通过与移动机器人底盘和升降平台运动通信，控制 Xtion 深度相机的视角采集玉米植株的三维信息，对获取的玉米植株三维信息进行处理。本系统概图如图 3 所示。

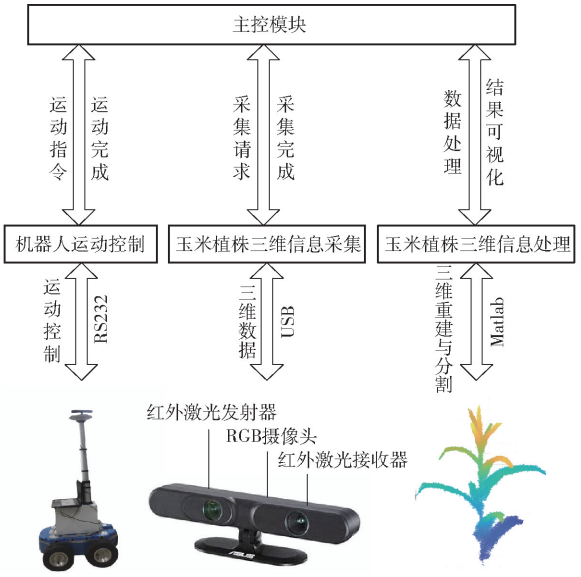


图 3　机器人三维信息采集系统概图

Fig. 3　Overview of robot acquisition system

1.3.1　移动机器人的运动控制

该系统玉米植株三维信息自动化采集依赖于机器人的精准运动控制。主控模块向移动机器人发送运动指令，移动机器人通过驱动器控制单元的控制指令传送到每个驱动电机执行相应的运动任务，即对应每个轮子的速度。

该轮式移动机器人在转向运动时，左侧两个轮子和右侧两个轮子运动相同，可以将其简化为两轮差动转向模型[27]。图 4 为移动机器人转向运动简化模型图，*XOY* 为世界坐标系，*xoy* 是以移动机器人两轮中间点为原点建立的局部坐标系。如图 4 所示，Δt 时间内移动机器人作半径为 R 转向运动。其中 θ_1 表示 Δt 时间转向运动的角度，θ_3 表示 Δt 时间相对于机器人世界坐标系中 *XOY* 的角度变化，L 为两轮间距，D 为两轮运动距离差。

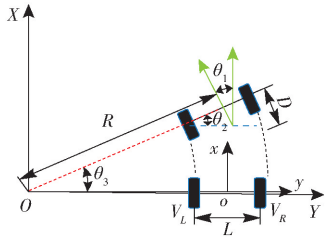


图 4　移动机器人转向运动简化模型

Fig. 4　Mobile robot simplified steering motion model

移动机器人转向运动的线速度 V 等于左右两轮速度的平均值，即

$$V = \frac{V_L + V_R}{2} \tag{1}$$

由图 4 中的几何关系可知 $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3$，其中当 Δt 很小时，θ_3 可以近似等价 D 与 L 的比值。因此，移动机器人转向运动的角速度 ω 即为

$$\omega = \frac{\theta_1}{\Delta t} = \frac{V_R - V_L}{L} \tag{2}$$

移动机器人转向运动的半径 R 等于线速度与角速度的比值，即为

$$R = \frac{V}{\omega} = \frac{L(V_R + V_L)}{2(V_R - V_L)} \tag{3}$$

根据玉米三维信息采集系统请求，主控模块向移动机器人发送运动命令。移动机器人通过速度模式转向运动，改变线速度与角速度，运动到特定位置。控制升降平台，调整 Xtion 深度相机的位姿。

1.3.2　玉米植株三维信息采集

玉米植株叶片与茎秆存在遮挡问题，单个视角容易造成局部信息的丢失。为了获取完整的玉米三维点云数据，将玉米植株置于机器人圆周运动的中心。移动机器人作半径为 R 的圆周运动，每次运动固定角度后，调整相机的位姿，保证玉米植株与 Xtion 深度相机的相对稳定，采集一次玉米植株的侧面点云图像，直到移动机器人运动完一周，获取不同角度的玉米植株点云。

Xtion 深度相机运动到每一个视点位置时，在其视角范围内放置一个棋盘，进行角点检测。并通过相机获取其角点的深度信息与深度相机内参数关系，计算此位置基于相机局部坐标系的点云。更改棋盘格位姿，进行多次计算，保证玉米植株每一个视点位置点云的信息的完整性。

对玉米植株获取多视角点云，进行点云配准，如图 5 所示。假定机器人运动的起始点作为深度相机三维信息采集的世界坐标系原点，获取的点云集为 $\boldsymbol{P}_1$，对应的坐标为 $\boldsymbol{C}_1$。机器人圆周运动旋转角为 θ，

获取点云集 $\boldsymbol{P}_2$,对应坐标 $\boldsymbol{C}_2$。圆周运动旋转角 θ 对应的两组点云变换矩阵为 $\boldsymbol{T}$。利用变换矩阵,得到最终配准后 $\boldsymbol{C}_1$ 坐标系下的点云 $\boldsymbol{P}_w$

$$\boldsymbol{P}_w = \boldsymbol{P}_1 + \boldsymbol{T}\boldsymbol{P}_2 \tag{4}$$

式中,$\boldsymbol{T}\boldsymbol{P}_2$ 将点云 $\boldsymbol{P}_2$ 从 $\boldsymbol{C}_2$ 的局部坐标下转换到 $\boldsymbol{C}_1$ 坐标下,与 $\boldsymbol{P}_1$ 点云并操作,变换到同一坐标系 $\boldsymbol{C}_1$ 下,即两组点云完成配准。对于其余位置视角的点云依次进行配准,最后完成玉米植株的完整三维点云拼接。

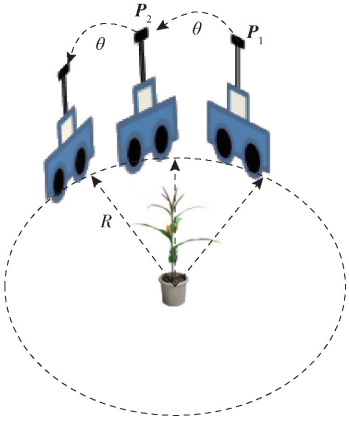


图 5 Xtion 相机图像采集过程

Fig. 5 Xtion camera image acquisition process

1.3.3 玉米植株三维信息处理

多角度获取的玉米植株三维点云数据进行配准,存在累积误差,造成重建的叶片较厚。为此,利用 PCL 中的直通滤波器和统计滤波器对原始三维点云进行背景和噪声处理[28]。通过直通滤波器对三维点云进行粗处理,快速剪除超出范围的离群点,将玉米植株区域提取出来。再使用统计滤波剔除一些稀疏分布的噪声点。对每一个点的邻域进行统计分析,计算其到 k 邻近点的平均距离 α。所有点构成高斯分布,其均值为 μ,标准差为 σ。将大于阈值 $\mu+\varepsilon\sigma$ 的点视为噪声点,将其剔除。其中参数 ε 影响滤波的效果,通过多组值比较,当 k 设为 10,ε 设为 5 滤波效果最好。

滤波后的玉米植株三维点云数据进行网格化与分割处理,提取出植株的各部分形态特征进行参数测定。该系统基于文献[29]工作的基础上,通过利用 Matlab 工具获取玉米植株三角网格模型进行网格化处理。然后,基于改进分水岭算法对玉米植株的三维网格分割,准确分割出各个叶片与茎秆。对分割后的叶片沿着叶脉选取多个点拟合出 3D 曲线,并用微分法对曲线长度进行计算,作为系统的叶片长度参数测量值。

2 结果分析与讨论

2.1 移动机器人的运动误差分析

该采集系统依赖于移动机器人的精准运动,将 Xtion 深度相机移动到不同的位置进行三维信息采集。通过设置不同的线速度和角速度改变半径 R,并保证在整个转向运动过程中半径 R 不变。由于受实验地面和机器人结构因素影响,移动机器人转向运动时会发生沿着局部坐标系 y 轴侧向滑动,导致转向运动的半径 R 出现偏差(即横向误差)。为了准确测量机器人转向运动横向误差,在机器人的三维采集作业范围内贴定坐标纸,如图 6 所示。



图 6 移动机器人实验场景

Fig. 6 Mobile robot experiment scene

针对不同角速度与线速度下不同半径的横向误差进行测定。同一组角速度与线速度实验进行多次横向误差测量,将其平均值作为该半径下的横向误差。对同一位置进行多次横向误差测量。半径为 1 m 时,移动机器人的转向运动轨迹如图 7 所示,选取 0°、90°、180°、270°的 4 个位置进行测量。

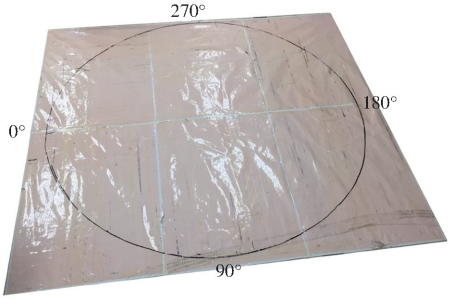


图 7 移动机器人转向横向误差测量

Fig. 7 Mobile robot steering calibration

每次测量的初始位置相同,保证了横向误差测量的独立性,其测量数据如表 1 所示。

从表 1 中可知,当机器人运动半径为 1 ~ 1.2 m 时,机器人的横向误差较小。每次采集 θ 过小将导致累积误差过大,θ 过大会造成点云数据的丢失。Xtion 结构光深度相机根据不同的距离投射不同的光斑,距离的不同,测量精度也不同。当在 0.85 ~ 1.2 m 范围内,Xtion 深度相机测量效果最好。因此,将机器人运动半径设置为 1 ~ 1.2 m,旋转角 θ 为 22.5°,相机的俯仰角设为 30°。

2.2 Xtion 深度相机的内参标定

为使采集获取点云信息准确,使用张正友标定

表 1　系统转向运动的横向误差

Tab. 1　Transverse error of system steering motion

编号	线速度/($m \cdot s^{-1}$)	角速度/($rad \cdot s^{-1}$)	半径/m	横向误差/mm
1	1.10	1.30	0.85	15
2	1.12	1.24	0.90	10
3	1.20	1.20	1.00	4
4	1.22	1.16	1.05	5
5	1.21	1.10	1.10	4
6	1.20	1.04	1.15	5
7	1.18	0.98	1.20	6
8	1.15	0.92	1.25	9
9	1.04	0.80	1.30	12

法对相机进行内参标定[30]，得出相机的内参矩阵为

$$\begin{bmatrix} f/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & f/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 285.92 & 0 & 162.91 \\ 0 & 286.10 & 124.21 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中，f 为相机的焦距，图像物理坐标系 (x, y) 原点在图像坐标系中的坐标为 (u_0, v_0)，每一个像素点在 x、y 轴上物理尺寸为 d_x、d_y。通过内参矩阵可以计算出相机局部坐标系下的点云。

相邻两个采集位置对应点云的变化矩阵 $\boldsymbol{T}$，通过变换矩阵 $\boldsymbol{T}$ 将相机局部坐标系下的点云换算到世界坐标系下，进行玉米植株的配准拼接。利用奇异值分解来求解变换矩阵

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} 0.927\,616 & -0.299\,213 & 0.223\,608 & -0.280\,54 \\ 0.298\,547 & 0.953\,654 & 0.037\,602\,8 & -0.018\,96 \\ -0.224\,496 & 0.031\,876\,7 & 0.973\,953 & 0.013\,270\,9 \end{bmatrix}$$

2.3　玉米植株的配准拼接与重建结果

移动机器人运动到不同位置，Xiton 深度相机多角度获取点云图像，将获取的多个角度点云进行配准拼接。对拼接后的点云进行滤波处理，完成玉米植株的三维重建。图 8 分别是玉米模型图、单一角度的点云、配准拼接和滤波后的三维重建。

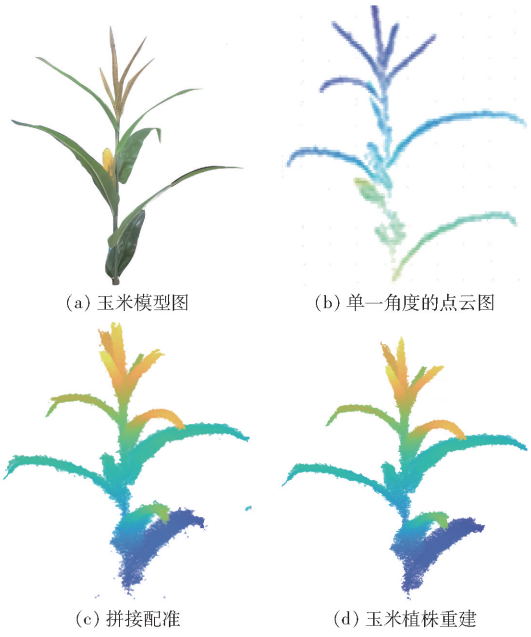
2.4　分割效果与三维信息的参数测定

对重建后的玉米植株三维点云进行网格化处理，其结果如图 9a 所示。并对其进行分割处理，其结果如图 9b 所示。每一种颜色代表玉米植株的一部分，共分割出 7 个叶片与茎秆，与实际玉米植株个数相等。

对分割后的叶片沿着叶脉拟合出一条 3D 曲线，利用微分法求出该曲线的长度。表 2 为测定值与手工测量值之间的误差。

2.5　讨论

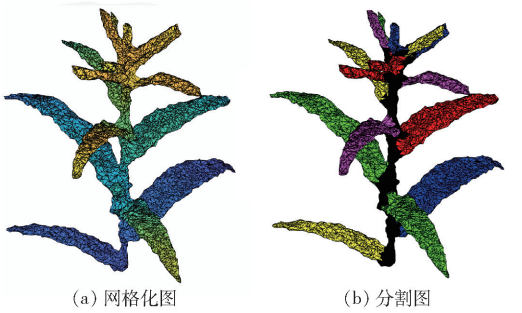
从表 2 中可以看出，该系统的测量值与手工测量值的误差不超过 5%。该系统的测量值总体小于实际测量值，其误差主要来自：移动机器人转向运动、Xtion 深度相机的精度、玉米植株三维点云的滤波和叶片曲线拟合。



(a) 玉米模型图　(b) 单一角度的点云图　(c) 拼接配准　(d) 玉米植株重建

图 8　玉米植株的配准拼接与重建结果

Fig. 8　Registration and reconstruction results of maize plants



(a) 网格化图　(b) 分割图

图 9　玉米植株的网格化与分割

Fig. 9　Meshing and segmentation of maize plants

表 2　玉米叶片 3D 曲线长度的测量误差

Tab. 2　Measurement error of corn leaves' 3D curve

叶片编号	本系统测量值/cm	手工测量值/cm	误差/%
1	42.8	44.2	3.2
2	52.6	54.1	2.8
3	60.2	61.2	1.6
4	61.5	63.1	2.5
5	78.9	80.0	1.4
6	78.2	82.1	4.8
7	81.5	84.3	3.3

移动机器人转向运动产生的横向误差，将影响玉米植株三维点云配准与拼接的准确性，可以通过调节移动机器人线速度和角速度，减小横向误差。Xtion 深度相机的分辨率只有 320 像素 ×240 像素，使用更高分辨率深度相机将会提高整个系统的准确性。由于每个叶片点云形状不相同，通过滤波器设置参数对玉米植株三维点云滤波，难以找到满足所有情况的参数值，可能将叶片边缘的点云剔除，导致

点云数据缺失。可以将深度信息与相机的 RGB 数据结合,设置 RGB 阈值对玉米植株点云背景和噪声进行剔除。玉米叶片表面存在波动,很难沿着叶脉找到一条准确的拟合曲线,需要更高阶的曲线进行拟合。

由于 Xtion 深度相机的限制,该系统适应于光照不强的生长室或者温室环境,并且需要将盆栽玉米植株移动到机器人工作区域。在系统中应添加更高精度深度相机,使移动机器人能在更多场景环境中对玉米植株进行数据采集。

3 结论

(1)提出一种基于移动机器人平台的玉米植株三维信息采集系统,构建了该系统的软硬件平台,对系统移动机器人运动控制、玉米植株三维信息采集与处理方法进行了阐述。

(2)机器人运动误差可以控制在 1 cm 之内,保证了系统的稳定性与鲁棒性。Xtion 深度相机内外参数的标定,保证了玉米植株局部点云信息的完整性与多角度点云配准拼接的准确性。

(3)玉米植株的拼接与重建结果表明,该系统获得较好的三维点云拼接,通过滤波处理重建出较高精度的玉米植株模型。玉米植株叶片参数测量误差在 1% ~5% 之间,证明了该系统应用于玉米植株三维信息采集的可行性。

参 考 文 献

[1] 刘刚,司永胜,冯娟. 农林作物三维重建方法研究进展[J]. 农业机械学报,2014,45(6):38 -46.
LIU Gang,SI Yongsheng,FENG Juan. 3D reconstruction of agriculture and forestry crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(6):38 -46. (in Chinese)

[2] LI Lei, ZHANG Qin, HUANG Danfeng. A review of imaging techniques for plant phenotyping[J]. Sensors, 2014, 14(11):20078 -20111.

[3] 赵春江,陆声链,郭新宇,等. 数字植物研究进展:植物形态结构三维数字化[J]. 中国农业科学,2015,48(17):3415 -3428.
ZHAO Chunjiang,LU Shenglian,GUO Xinyu,et al. Advances in research of digital plant:3D digitization of plant morphological structure[J]. Scientia Agricultura Sinica,2015,48(17):3415 -3428. (in Chinese)

[4] 方慧,胡令潮,何任涛,等. 植物三维信息采集方法的研究[J]. 农业工程学报,2012,28(3):142 -147.
FANG Hui, HU Lingchao, HE Rentao, et al. Research on plant three-dimensional information acquisition method[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3):142 -147. (in Chinese)

[5] 王传宇,郭新宇,吴升,等. 基于计算机视觉的玉米果穗三维重建方法[J]. 农业机械学报,2014,45(9):274 -279.
WANG Chuanyu,GUO Xinyu,WU Sheng, et al. Three dimensional reconstruction of maize ear based on computer vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(9):274 -279. (in Chinese)

[6] GAETAN L, SERGE C, ANNIE E, et al. Characterization of whole plant leaf area properties using laser scanner pointclouds[C]//Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA), 2012 IEEE Fourth International Symposium on. IEEE, 2012: 250 -253.

[7] 刘鑫, 许华荣, 胡占义. 基于 GPU 和 Kinect 的快速物体重建[J]. 自动化学报, 2012, 38(8):1288 -1297.
LIU Xin, XU Huarong, HU Zhanyi. GPU based fast 3D-object modeling with Kinect[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(8):1288 -1297. (in Chinese)

[8] 王可,戈振扬,郭浩,等. 基于 Xtion 传感器的玉米果穗三维形态指标测量系统[J]. 传感器与微系统,2015,34(4):62 -65.
WANG Ke,GE Zhenyang,GUO Hao,et al. 3D shape indexes measurement system of maize ear based on Xtion sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies,2015,34(4):62 -65. (in Chinese)

[9] 徐胜勇,卢昆,潘礼礼,等. 基于 RGB -D 相机的油菜分枝三维重构与角果识别定位[J]. 农业机械学报,2019,50(2):21 -27.
XU Shengyong, LU Kun, PAN Lili, et al. 3D reconstruction of rape branch and pod recognition based on RGB -D camera[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(2):21 -27. (in Chinese)

[10] 周朗明,郑顺义,黄荣永. 旋转平台点云数据的配准方法[J]. 测绘学报,2013,42(1):73 -79.
ZHOU Langming,ZHENG Shunyi,HUANG Rongyong. A registration algorithm for point clouds obtained by scanning objects on turntable[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2013,42(1):73 -79. (in Chinese)

[11] 邵小宁. 基于 Kinect 的植物三维点云获取与重建方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.
SHAO Xiaoning. Research on 3D point cloud acquisition and reconstruction method of plant based on Kinect[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)

[12] 夏春华,施滢,尹文庆. 基于 TOF 深度传感的植物三维点云数据获取与去噪方法[J]. 农业工程学报,2018,34(6):168 -174.
XIA Chunhua, SHI Ying, YIN Wenqing. Obtaining and denoising method of three-dimensional point cloud data of plants based on TOF depth sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6):168 -174. (in Chinese)

[13] 仇瑞承,张漫,魏爽,等. 基于 RGB -D 相机的玉米茎粗测量方法[J]. 农业工程学报,2017,33(增刊):170 -176.
QIU Ruicheng,ZHANG Man,WEI Shuang, et al. Method for measurement of maize stem diameters based on RGB -D camera

[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(Supp.):170 - 176. (in Chinese)
[14] 胡鹏程,郭焱,李保国,等. 基于多视角立体视觉的植株三维重建与精度评估[J]. 农业工程学报,2015,31(11): 209 - 214.
HU Pengcheng,GUO Yan,LI Baoguo, et al. Three-dimensional reconstruction and its precision evaluation of plant architecture based on multiple view stereo method [J]. Transactions of the CSAE,2015,31(11): 209 - 214. (in Chinese)
[15] 张建,李宗南,张楠, 等. 基于实测数据的作物三维信息获取与重建方法研究进展[J]. 华中农业大学学报,2013,32(4): 126 - 134.
ZHANG Jian,LI Zongnan,ZHANG Nan,et al. Advances in 3D information collection and reconstruction of crop based on the measured data[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2013,32(4):126 - 134. (in Chinese)
[16] CLARK R,MACCURDY R, JUNG J, et al. Three-dimensional root phenotyping with a novel imaging and software platform [J]. Plant Physiol., 2011, 156:455 - 465.
[17] NICOLAS V, KASRA S, POURIA S,et al. Field Scanalyzer: an automated robotic field phenotyping[J]. Functional Plant Biology, 2017, 44(1):143 - 153.
[18] XIAO D, GONG L,LIU C. Phenotype-based robotic screening platform for leafy plant breeding[J]. IFAC-Papers OnLine, 2016,49(16):237 - 241.
[19] WEISS U, BIBER P. Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D LiDAR sensor[J]. Robot. Auton. Syst., 2011, 59(5):265 - 273.
[20] 权龙哲,申静朝,奚德君,等. 狭闭空间内苗盘物流化搬运机器人运动规划与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(1):51 - 59.
QUAN Longzhe,SHEN Jingchao,XI Dejun, et al. Planning and test of robot for reedling tray handling in narrow space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(1):51 - 59. (in Chinese)
[21] DAVID D, JOSE J, HAMLYN J, et al. Proximal remote sensing buggies and potential applications for field-based phenotyping [J]. Agronomy, 2014,4(3):349 - 379.
[22] 张漫,苗艳龙,仇瑞承,等. 基于车载三维激光雷达的玉米点云数据滤波算法[J]. 农业机械学报,2019,50(4):170 - 178.
ZHANG Man,MIAO Yanlong,QIU Ruicheng, et al. Maize point cloud data filtering algorithm based on vehicle 3D LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4):170 - 178. (in Chinese)
[23] ARNO R, PETER B, MICHAEL D, et al. BoniRob—an autonomous field robot platform for individual plant phenotyping[C]//The 7th European Conference on Precision Agriculture, 2009.
[24] VADIM T, RALPH K, ARNO R, et al. Multi-sensor simulation method for outdoor plant phenotyping based on autonomous field robots[C]//International Conference of Agricultural Engineering, Spain, 2012.
[25] AYAN C, CHRISTOPHER W, ALI T,et al. Computer vision based automous robotic system for 3D plant growth measure[C]//12th Conference on Computer and Robot Vision,2015.
[26] HANG L, LIE T,STEVEN A, et al. Robotic platform for corn seeding morphological traits characterization[J]. Sensors, 2017, 17(9):2082.
[27] 王雪松. 四驱轮式移动机器人运动控制系统研究与设计[D]. 上海:上海大学,2016.
WANG Xuesong. Research and design of motion control system for four-wheel wheeled mobile robot [D]. Shanghai: Shanghai University,2016. (in Chinese)
[28] 张伟洁,刘刚,郭彩玲,等. 基于三维点云的苹果树叶片三维重建研究[J]. 农业机械学报,2017,48(增刊):103 - 109.
ZHANG Weijie, LIU Gang, GUO Cailing, et al. Apple tree leaf three-dimensional reconstruction based on point cloud[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(Supp.):103 - 109. (in Chinese)
[29] 劳彩莲, 杨瀚, 李鹏,等. 基于消费级深度相机的玉米植株三维重建[J/OL]. 农业机械学报. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20190412.1111.004.html.
LAO Cailian, YANG Han, LI Peng, et al. 3D reconstruction of maize plants based on consumer depth camera[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20190412.1111.004.html. (in Chinese)
[30] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000,22:1330 - 1334.