

植物结构光点云曲面的重建及参数测量^{*}

金奇益 刘 柳 徐梦竹 马 尚 陈颖铎

(北京林业大学理学院 北京 100083)

摘 要: 随着机器视觉等技术的发展,深度相机在三维建模等方面的应用也越来越广泛。从数学角度推导并分析了 Kinect 传感器的结构光原理。针对植物的表型曲面重建,设计了使用 Kinect 获取植物表型的点云数据,间隔一定角度采集图像,通过点云坐标的旋转变换拼接成完整点云图。采用直通滤波和统计滤波法完成植物点云图的滤波,利用贪婪投影三角化法对植物点云集进行曲面重建。最后借助 MeshLab 实现对所得曲面模型的 3D 重现以及叶片长度等参数的测量。实验结果表明,重建的植物曲面模型的表型参数与实测值无显著差异,测量结果精度高,相对误差保持在 5% 以内,所述方法能够满足植物表型三维重建的需求。

关键词: 深度相机; Kinect; 结构光; 点云; 曲面重建

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.2040

Surface reconstruction and parameter measurement of plants
based on structured light point cloud

Jin Qiyi Liu Liu Xu Mengzhu Ma Shang Chen Yingduo

(College of Science of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: With the development of technologies such as machine vision, depth cameras are becoming more and more widely used in 3D modeling. For the phenotypic surface reconstruction of plants, designed a method to obtain the point cloud data of the plant phenotype by Kinect, and collected images at a certain angle interval and stitched into a complete point cloud image by rotating the point cloud coordinates. Then used straight-through filtering and statistical filtering to complete the filtering of the plant point cloud image. Then used the greedy projection triangulation method to reconstruct the surface of the plant point cloud. Finally, the 3D reproduction of the obtained surface model was implement with the help of MeshLab software as well as the measurement of blade length parameters. Experimental results show that there is no significant difference between the phenotypic parameters of the reconstructed plant surface model and the measured values, and the relative error is kept within 5%, this method can meet the needs of 3D reconstruction of plant phenotype.

Keywords: depth sensor; Kinect; structured light; point cloud; surface reconstruction

0 引 言

以二维图形为基础的传统图像记录方式虽然应用广泛,但由于没有记录深度信息,导致无法对图像进行全方位的观察和分析。特别在植物观察与农作物生长监测领域,寻求一种在三维空间内获取植物表面点的坐标并进行可视化处理和三维测量的方法具有重要意义。目前,植物表型点云的获取主要依赖以下 5 种技术:1)双目或多目立体视觉技术;2)激光扫描技术;3)飞行时间技术;4)结构光技术^[1];5)光学相干层析技术。由于激光扫描等三维成像技

术价格昂贵,限制了其在农业测量中的应用。近年来,以 Kinect 为代表的基于 TOF 技术和结构光技术的深度相机的发展为三维信息的采集和测量提供了技术手段^[2]。利用 Kinect 设备,可以实现远程、高效、无损的点云采集,通过对目标点云的预处理和点云配准实现点云成像^[3-4],最后利用贪婪投影三角化完成曲面重建,虽然其重建精度易受到图像获取条件与环境光等因素的影响^[5],但随着光束平差等后期处理方法的发展,重建精度已有很大的提升。基于 Kinect 的植物结构光点云曲面重建不仅可以直观地观察植物生长状况,还可以在曲面模型上测量植物的叶茎参数,对

收稿日期:2020-12-19

^{*} 基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2019SG04)、北京市大学生创新计划项目(S201910022093)资助

推进农业现代化与信息化具有巨大的实用价值和重要的现实意义。

本文设计利用 Kinect 获取点云数据以及编程实现点云处理和曲面重建的流程,最后在 MeshLab 中完成叶片长度等参数的测量。

1 曲面重建流程及结构光原理

植物点云获取及曲面重建流程如图 1 所示。

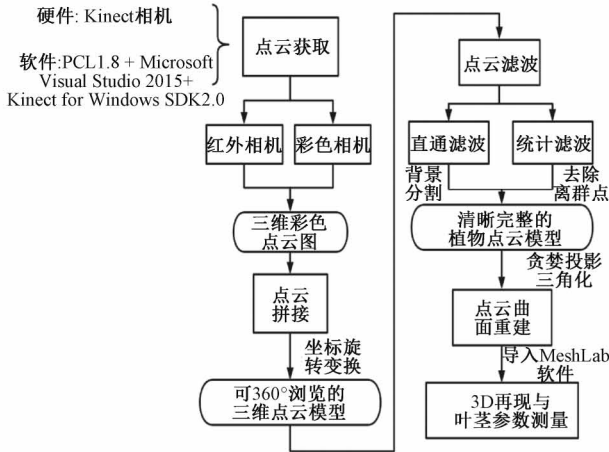


图1 植物点云获取及曲面重建流程

1.1 Kinect 传感器硬件结构

Kinect 传感器是 Microsoft 公司开发的应用于 Xbox 体感游戏的深度相机。由于其具有测距功能,可用于获取物体空间点云数据,因此在医疗、建筑、文物修复方面都有极大的应用价值。

Kinect 深度传感器由主控芯片、麦克风阵列和 3 个镜头组成。其中,作为 Kinect 深度传感器的核心部件,主控芯片承担了大部分的计算工作,它的逻辑计算能力强大,可以对红外图像进行编码,然后投射近红外光谱^[6]。

Kinect 采用主动探测的方式,由红外发射器向目标物体发射连续红外光波,再由红外接收器获得反射传回的光信息,并将信息传递给主控芯片。彩色相机主要用于获取目标彩色数据,不涉及测距^[7]。

1.2 飞行时间原理

飞行时间(time of flight, TOF)基本原理是通过发射连续波到目标物体上,然后用传感器接收反射光,通过光的飞行时间来计算与物体的距离^[8]。

TOF 相机一般可以分为两类:一类搭载了周期脉冲光源;另一类则搭载了连续波调制光源。其中连续波调制又分为方波和正弦波,而实际应用中通常采用正弦波调制^[9]。

与结构光类似,TOF 也采用主动探测机制。而 TOF 照射单元的目的不是照明,而是发射连续正弦波,由于接收器所接收到的正弦波和发射器发射的正弦波存在相位偏移,且相位差和目标物体的距离成正比,因此可以利用相位差来测量距离,如图 2 所示。

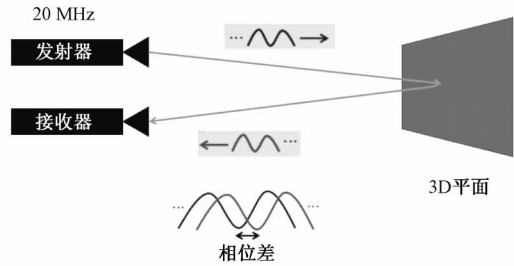


图2 连续波调制原理

据此,可以用连续波调制来推导 TOF 相机的测距原理。

假设发射的连续正弦波函数为 $s(t)$, 振幅为 a , 调制频率是 f , 则发射信号表达式为:

$$s(t) = a \cdot (1 + \sin(2\pi ft)) \quad (1)$$

经过延时 Δt , 接收到的信号为 $r(t)$, 设衰减后的波信号振幅为 A , 信号强度偏移为 B , 则可以得到接收信号的表达式为:

$$r(t) = A \cdot (1 + \sin(2\pi f(t - \Delta t))) + B \quad (2)$$

设 4 个采样时间间隔相等, 均为 $T/4$, 可列出如下方程组:

$$r_k(t) = A \cdot \sin\left(\frac{k}{2}\pi - \Delta\varphi\right) + (A + B) \quad (3)$$

计算得到发射和接收的正弦信号的相位偏移:

$$\Delta\varphi = \arctan2(r_2 - r_0, r_1 - r_3) \quad (4)$$

根据飞行时间公式可以计算得出物体和深度相机的距离:

$$d = \frac{c}{2} \cdot \Delta t = \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta\varphi}{2\pi f} \quad (5)$$

2 点云图像获取

2.1 软硬件实验装置

本文在 Windows 下使用 Microsoft Visual Studio 作为开发工具, 主要编程语言为 C++。获取目标点云数据需要选择在尽量空旷且无过多光源干涉的环境中进行。由于相机可以捕捉近 150° 广角的图像, 所以放置相机的高度无严格要求。但为了获取的点云深度数据精确有效, 红外相机发射红外激光的方向应与地面保持水平^[10]。因此, 为了获得较好的目标图像正视图, 把相机高度设置在与目标物体中心一致高度上, 如图 3 所示。

2.2 点云图像获取流程

点云数据包括彩色图像信息和深度图像信息(R、G、B、D)^[11]。由于彩色相机和红外相机获得的彩色图像和深度图像的中心不同, 需要通过坐标变换可使二者处于同一坐标系内。

Kinect 相机一次只能采集目标物体一个面的图像, 因此想要获得物体 360° 的点云图, 必须从不同角度拍摄物体, 并将得到的点云图经过一定的旋转变换拼接起来。如图 4



图 3 空旷的环境与相机放置

所示,第 1、2 张照片为空旷地面与底座的点云图,仅用于测试,不参与成像;第 3~8 张照片为玩偶每次顺时针旋转 60° 拍摄的照片。

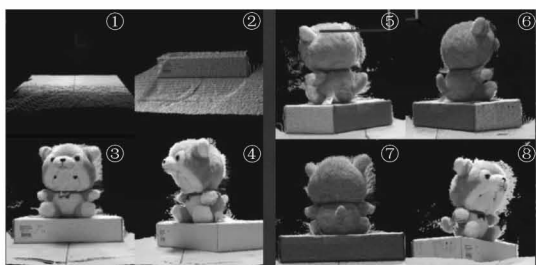


图 4 对目标进行 6 个角度拍摄

将获得的点云图分别对应旋转 0°、60°、120°、180°、240°、300°,将它们拼接为可以 360° 浏览的三维点云图像。三维图像可看作是无数二维平面在垂直方向上的积分,在坐标系下表示为:

$$P_T(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dz \quad (6)$$

将三维图像 $P_T(x_0, y_0, z_0)$ 绕点 (a, b, c) 顺时针旋转 θ , 得到新的图像 $P'_T(x_1, y_1, z_1)$, 二者变换关系如式(7)所示。

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & a \\ 0 & 1 & b \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix}, (Z = Z_0) \quad (7)$$

3 背景分割及去噪处理

由于获取点云的过程中会受到环境因素以及电磁波衍射的影响^[12],点云图中难免会出现一些噪点,此外还有背景点云的干扰使得点云成像杂乱,因此需要进行点云滤波去噪。

3.1 使用直通滤波器进行背景分割

PCL 的函数库中包含直通滤波器对象,可以指定保留坐标范围内的点云,过滤掉其他点云,从而完成背景分割。

本文选取范围为 $\begin{cases} -0.3 < x < 0.3 \\ 0.03 < y \\ 0 < z < 1.2 \end{cases}$ (单位:m),只保留植

物本身的点云。

3.2 使用统计滤波器去除离群点

利用 TOF 原理获取的点云图往往会出现密度不均匀的点云,偏离点云群主体的点称为离群点。此外,环境因素的干扰也会导致稀疏离群点的产生。如果通过计算采样点处的法向量或者曲率变化来估计点云的局部特征,会使运算变得十分复杂,且更容易出现错误的点云信息^[13]。因此,本文采用统计滤波法来去除离群点。具体做法是计算每个点到与它临近的所有点的平均距离,将所得结果统计分布与高斯分布比较,因为分布函数曲线形状由均值和标准差决定,所以统计点云平均距离接近全局平均距离平均值的点将被视为主体点云保留,在全局距离平均值之外的点将被视为离群点从点云集中滤除^[14]。滤波前后的植物点云图对比如图 5 所示。

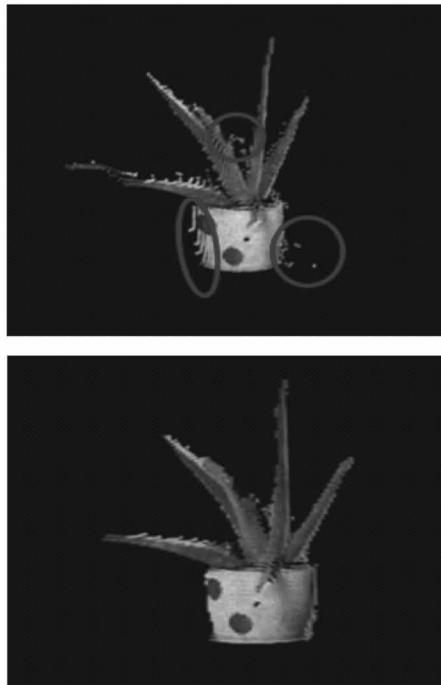


图 5 统计滤波前后植物点云对比图

4 实验结果与分析

4.1 曲面重建

曲面重建主要分为插值法和逼近法两类^[15]。本文采用了 PCL 内置的 Greedy Projection 算法^[16]。该算法的原理是将三维的点通过法线投影到平面上,然后基于增量表面生长原理,对投影点在平面上作三角化,得到投影后的点的拓扑连接关系^[17]。其中,三角化过程中用到了基于 Delaunay 的空间区域增长算法^[18],通过选取一个样本三角片作为初始曲面,使其不断扩大曲面边界,直至遍历所有点,每个点都会与两个最优邻近点形成三角,得到一张三角网格曲面^[19]。根据投影点云的拓扑关系可以通过映射确定各原始点之间的拓扑连接^[20],最终所得的立体三角网格

曲面即为重建的曲面模型。

4.2 叶茎参数测量

将重建后的曲面模型导入 MeshLab,如图6所示。借助 MeshLab 测量工具,可以直接测出两处点云的点距。只需要确定曲面模型上的两点,由于所有点云都具有深度信息,因此根据三角测距原理,易得出两点之间的距离。如图7所示,分别测量盆高、株高、叶片长度等数据。

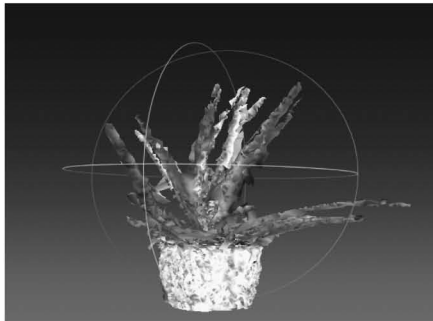


图6 重建后的植物三角化曲面模型

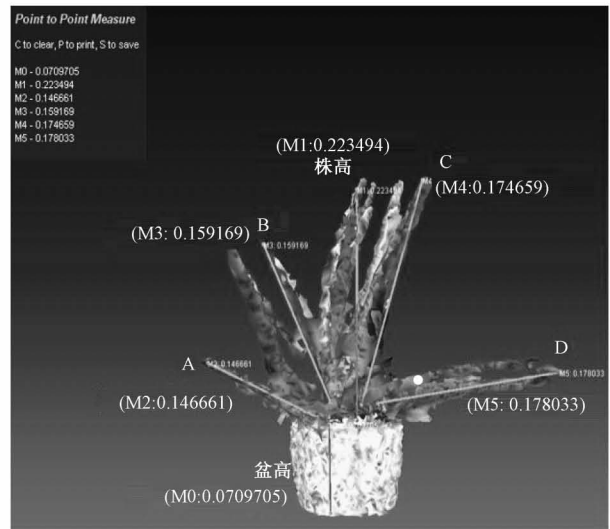


图7 用 MeshLab 测量工具测量盆高及植物叶片长度

对比实际测量结果,如表1所示,各项参数的测量相对误差都在5%以内,精度和结果可信度较高。

表1 MeshLab 测量工具与实际测量结果对比

测量目标	盆高 (M0)	株高 (M1)	叶片 A 长度 (M2)	叶片 B 长度 (M3)	叶片 C 长度 (M4)	叶片 D 长度 (M5)
实际测得参数/m	0.071	0.228	0.150	0.163	0.178	0.182
Meshlab 测得点距/m	0.070	0.223	0.147	0.159	0.174	0.178
相对误差/%	1.4	2.1	2.0	2.5	2.2	2.2

5 结 论

本文通过数学公式推导分析了 Kinect 深度相机结构光的测距原理,并在此基础上进行实验,成功获取了植物点云的深度信息和彩色信息。通过搭建可控转台减小了植物旋转时的误差,优化了实验操作。利用直通滤波完成了背景分割,提取了植物主体部分,再进行统计滤波去除离群点,获得了较清晰完整的植物点云图。最后将所得植物点云图通过贪婪投影三角化法转化成三角化曲面模型,并在 MeshLab 软件上完成曲面模型的再现以及植物叶茎长度的测量。实验结果表明,该方法重建的曲面模型完成度和完整度较高,且各项几何参数与实际误差极小,测量结果具有较高的可信度,同时也验证了对植物进行曲面重建在远程观察及测量方面的可行性。

参考文献

- [1] 史艳侠,娄小平,李伟仙. 线结构光点云粗拼接方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(6): 12-16.
- [2] 耿璇,王召巴,金永,等. 基于单个深度相机的人体三维重建[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(9): 143-146.
- [3] 李茂月,马康盛,王飞,等. 基于结构光在机测量的叶片点云预处理方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 55-66.
- [4] 李玉梅,万旺根,王旭智. 三维重建中点云配准算法研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(12): 75-79.
- [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, 253.
- [6] 高铭泽. 基于深度图像的三维重建技术研究及应用[D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
- [7] 胡良梅,杨慧,张旭东,等. 融合 RGB 特征和 Depth 特征的 3D 目标识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(10): 1431-1439.
- [8] 张韶辉,胡摇,曹睿,等. 光场成像原理及应用技术[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(2): 178-186.
- [9] 侯飞. 基于飞行时间的三维目标点云提取和重建研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2019.
- [10] 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.
- [11] 夏春华,施澄,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.

- [12] 鲁冬冬,邹进贵.三维激光点云的降噪算法对比研究[J].测绘通报,2019(S2):102-105.
- [13] 王金志,钱培聪.基于 Kinect v2 的香蕉点云降噪方法[J].南方农机,2020,51(10):209.
- [14] 刘辉,王伯雄,任怀艺,等.基于三维重建数据的双向点云去噪方法研究[J].电子测量与仪器学报,2013,27(1):1-7.
- [15] 范强,刘鹏.基于中值法改进 Marching Cubes 曲面重建算法[J].测绘与空间地理信息,2019,42(12):11-14.
- [16] 舒丽君,陆玲.基于 PCL 库三维点云树枝重建[J].电脑与信息技术,2020,28(2):1-4.
- [17] 田哲浩.三维点云数据精简与网格重建算法研究[D].秦皇岛:燕山大学,2019.
- [18] 吴旭,卢凌雯,梁栋栋,等.基于点云数据的曲面重建算法比较研究[J].安徽师范大学学报(自然科学版),2019,42(1):46-50.
- [19] 于明旭.离散点云数据三维重建原理与误差分析[J].黑龙江科技信息,2019(5):21-23.
- [20] 宋瑞.基于点云数据的大型复杂曲面重建方法研究[D].成都:电子科技大学,2019.

作者简介

金奇益,本科,主要研究方向为电子信息科学与技术。

E-mail:156277413@qq.com

刘柳(通信作者),实验师,主要研究方向为生化检测技术。

E-mail:v66123@bjfu.edu.cn

徐梦竹,本科,主要研究方向为电子信息科学与技术。

E-mail:854268997@qq.com

马尚,本科,主要研究方向为数字媒体技术。

E-mail:1900482133@qq.com

陈颖铎,本科,主要研究方向为电子信息科学与技术

E-mail:cydbfu@163.com