doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.023

基于 Kinect 相机的土壤表面三维点云配准方法

刘　振[1]　杨　玮[1]　李民赞[1]　郝子源[1]　周　鹏[1]　姚向前[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. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了更好地建立土壤表面的三维点云形态结构模型,使用 Kinect 相机拍摄土壤表面,获取土壤表面的彩色图像和深度图像。针对传统最近点迭代算法对配准点云的空间位置要求比较严格的问题,采用了点云初始配准的方法。这种方法首先去除土壤表面深度图像的无用背景信息以及噪声,再对三维点云进行初始配准以及精确配准。在初始配准的过程中,对获取的土壤表面点云信息进行归一化对齐径向特征关键点搜索,得到具有代表性、且比较均匀的点云关键点,然后采用快速点特征值直方图的方法提取关键点的特征值,采用随机抽样一致性算法提纯映射关系,以此来完成点云的初始配准。最后采用最近点迭代算法完成土壤表面三维点云的精确配准。传统的最近点迭代算法的配准时间是 58.2 s,配准误差是 3.80 cm,改进后的方法配准时间为 124.8 s,配准误差为 0.89 cm。相比传统最近点迭代算法,改进后方法的配准时间虽延长了 66.6 s,但配准误差降低了 2.91 cm。结果表明,该方法简单,易于处理,成本较低,可以实现土壤表面的三维重建。

关键词: 土壤表面; Kinect 相机; 三维点云; 最近点迭代算法

中图分类号: TP391.41　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)S0-0144-06

Three-dimensional Point Cloud Registration Method for Soil Surface Based on Kinect Camera

LIU Zhen[1]　YANG Wei[1]　LI Minzan[1]　HAO Ziyuan[1]　ZHOU Peng[1]　YAO Xiangqian[2]

(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: In order to establish a better three-dimensional point cloud morphological structure model of soil surface, a Kinect camera was used to obtain color images and depth images of the soil surface. For the traditional nearest point iterative algorithm in the point cloud registration, the space position requirements are more stringent, thus the method of initial registration of point cloud was proposed. Firstly, it was necessary to remove the useless background information and noise of the depth image of the acquired soil surface, and then initial registration and precise registration of the three-dimensional point cloud were performed. In the initial registration process, the point cloud information of the acquired soil surface was normalized and aligned to the radial feature key point search to obtain representative and relatively uniform point cloud key points, and then the fast point feature value histogram method was used to extract the eigenvalues of the key points, and finally the random sampling consistency algorithm was used to purify the mapping relationship, thereby completing the initial registration of the point cloud. Finally, the nearest point iteration algorithm was used to accurately register the three-dimensional point cloud on the soil surface. The registration time of the traditional nearest point iterative algorithm was 58.2 s, the registration error was 3.80 cm, the improved method registration time was 124.8 s, and the registration error was 0.89 cm. Compared with the traditional nearest point iterative algorithm, the registration time of the improved method was extended by 66.6 s, but the registration error was reduced by 2.91 cm. The results showed that the method was simple, easy to handle, and low in cost, and can realize three-dimensional reconstruction of the soil surface.

Key words: soil surface; Kinect camera; 3D point cloud; nearest point iteration algorithm

收稿日期: 2019-04-20　修回日期: 2019-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(31801265)和国家重点研发计划项目(2016YFD0700300-2016YFD0700304)

作者简介: 刘振(1993—),男,硕士生,主要从事土壤质地图像处理研究,E-mail: 15652351213@163.com

通信作者: 杨玮(1981—),女,副教授,博士生导师,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: cauyw@cau.edu.cn

0　引言

三维重构是指建立物体的三维模型，并且在计算机环境下能对该物体进行三维信息的识别和认知[1]。在现代农业的发展历程中，利用图像处理、虚拟结合等技术对农作物以及土壤表面的模型进行三维重建和可视化，是国内外农业发展的重要内容[2]。

基于 Kinect 相机三维重建原理的研究与结构光法相似，故引起了很多学者的兴趣[3-5]。根据测量设备与目标接触的情况，对物体进行三维重建的方法可分为接触式测量方法与非接触式测量方法。接触式测量方法利用三维坐标测量机对机械配件进行测量，所得精度较高，但是在待测物体表面易变形、易损坏等场合的应用受到一定的限制。对土壤表面进行三维重建大都采用非接触式测量方法，常用的方法有立体摄影法和激光测量法[6]。立体摄影法使用 2 个相机同时拍摄，利用空间前方交会计算测量土壤表面高度；激光测量的基本原理是将低能氦氖激光照射在土壤表面，利用土壤反射得到激光束，并将其聚集在光电二极管阵列上。2 种测量方法的测量精度虽较高，但是成本比较昂贵，并且还需要专业技术人员进行操作处理[7-8]。计璐艳等[9]利用显微图像时间序列的方法对土壤表面进行三维重建，即利用土表水分蒸发过程中土壤颗粒凹形水面上镜面反射点的位移对土壤的表面进行三维重构。该方法成本不高，但仅对砂质土壤做了实验，且只给出目视评价，未做精度验证。NEWCOBE 等[10]构建了 KinectFusion 系统，对单独物体和小范围静态场景进行三维重建，得到较好的重建效果，但重建的效率有待进一步提高。

为了提高土壤表面三维重建的精度，本文对土壤表面进行三维重建时，利用 Kinect 相机拍摄土壤表面，针对传统的最近点迭代(Iterative closest point，ICP)算法对配准点云的空间位置要求苛刻的问题，采用改进的 ICP 算法，以提高配准精度，更好地完成对土壤表面的三维重建。

1　材料与方法

1.1　土壤表面图像采集

采集土壤表面图像，采用设备包括 Kinect 相机、带有 i7 处理器的便携式计算机(用于连接 Kinect 相机)、12 V 的铅酸蓄电池(2 块)、400 W 的逆变器(用于把铅蓄电池的 12 V 电压转换为 220 V 交流电)。

利用第 2 代 Kinect 相机拍摄土壤的表面，以获取土壤表面彩色图像和深度图像。Kinect 相机有彩色摄像机和红外深度摄像机，可以快速获取彩色图像和深度图像[11]。Kinect 在众多领域的应用中，更倾向于物体的三维重构[12-14]。在获取深度数据时，其测量精度与测量距离有关。当测量距离小于 2 m 时，精度可以保持在 1 cm 以下；当测量距离是 0.6 ~ 1.0 m 时，其测量精度会提高，约为 3 mm；当测量距离为 0 ~ 0.6 m 时，精确度可达 1 mm[15]。第 2 代 Kinect 相机及其参数分别如图 1 和表 1 所示。



图 1　第 2 代 Kinect 相机示意图

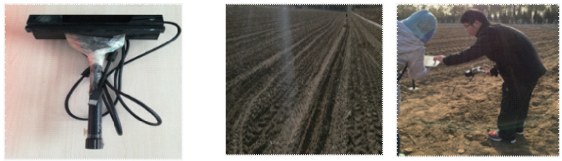
Fig. 1　Schematic of the second generation Kinect camera

表 1　第 2 代 Kinect 相机参数

Tab. 1　Parameters of the second generation Kinect camera

参数	数值
帧频率/(f·s^{-1})	30
支持内存/GB	2
视场角/((°)×(°))	70×60
深度图像分辨率/(像素×像素)	512×424
RGB 图像分辨率/(像素×像素)	1 920×1 080
深度信息有效测量距离/m	0.5 ~ 8.0

实验地点为中国农业大学上庄实验站，实验时间是 2018 年 3 月 11 日，实验田长 220 m，宽 40 m，面积为 8 800 m^2，使用 Kinect 相机对该土地进行连续拍摄。实验中共标记了 50 个采样点，每一个采样点在实验田横向距离为 10 m，纵向距离为 5 m。为了方便手持 Kinect 相机拍照，Kinect 相机的下端固定了支架(图 2a)，实验场景如图 2b 所示。土壤表面三维重建的技术路线如图 3 所示，过程主要包括实验设计、土壤表面原始点云的获取以及预处理、土壤表面点云三维重建自动化研究。其中点云的初始配准和精确配准最为关键。土壤表面点云三维重建的自动化研究主要包括点云初始配准、误差控制、点云精确配准和全局配准。



(a) 带支架Kinect相机　　(b) 实验场景

图 2　实验用相机和实验场景

Fig. 2　Experimental Kinect camera and test scenarios

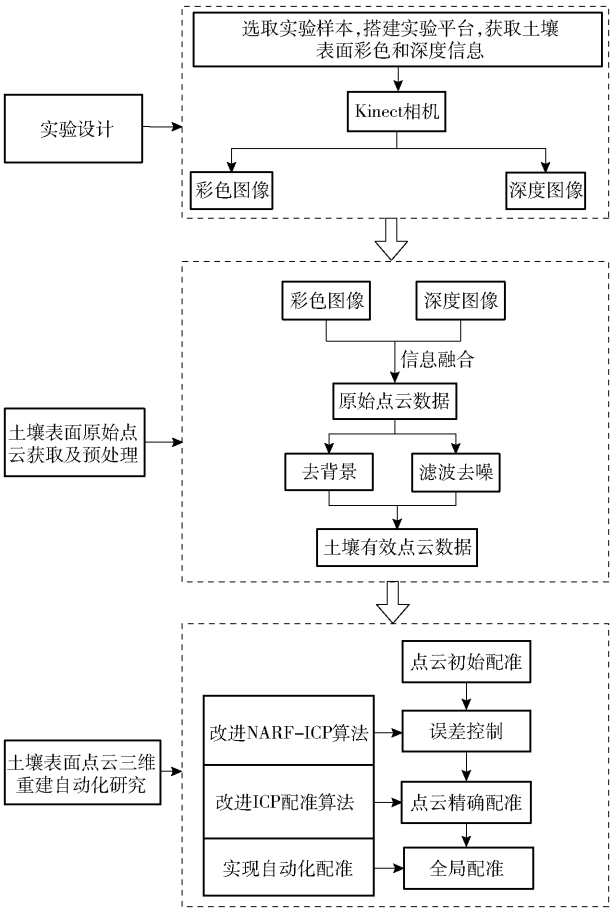


图 3 土壤表面三维重建的技术路线

Fig. 3 Technical route for 3D reconstruction of soil surface

采用 Kinect 相机进行连续拍摄,获取土壤表面的彩色图像和深度图像。为了使深度图像更好反映土壤的表面,需要调整拍摄距离,最佳距离为 0.8 ~ 1.2 m;同时也使得深度图像中的像素点可以更清晰地表达土壤表面的几何形状,方便后续图像处理。图 4 为土壤表面形状不相同的两处的土壤表面的彩色图像和深度图像。

1.2 土壤表面三维点云的预处理

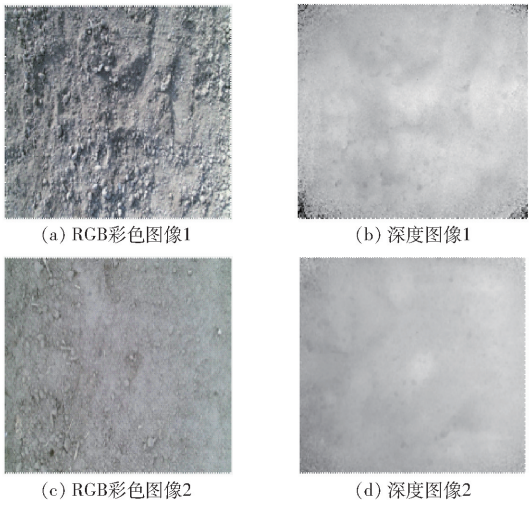
1.2.1 去除图像中无用的背景信息

土壤表面的三维点云预处理时,需根据土壤表面三维点云的位置信息,利用三维空间坐标并且设定合适的阈值去除土壤表面图像中无用的背景信息,包括土壤表面一些明显的杂质等,以此获取土壤表面的点云信息。将偏差小于阈值的样本点视为内样本点,否则视为外样本点。在阈值设定的范围内,分别设定 x、y、z 方向上的范围,在三维坐标的各个方向上分别设定最大值和最小值,即 $x_i \in (x_{\min}, x_{\max})$,$y_i \in (y_{\min}, y_{\max})$,$z_i \in (z_{\min}, z_{\max})$。将土壤表面原始点云的数量设为 n_1,土壤表面无用背景去除的流程如图 5 所示。

1.2.2 土壤表面点云的去噪

在实验过程中,实验数据会受到外界环境的影响,以及测量设备等存在的误差,导致 Kinect 相机拍摄到的图像存在噪声干扰。当噪声点大部分存在于深度图像中间位置时,获取的点云数据会受到很大影响。针对这些噪声点,本文采用 PCL 点云库中的统计学离群滤波的方法将其滤除[16-17]。对于去除背景后的土壤表面,由于点云中点与点之间的空间位置是拓扑关系,且点云上分布的点云数据是散乱无序的,因此有必要查找各个数据点的空间邻域点以判断土壤表面点云中离群噪声点是否需要进行滤除。Kd - Tree(K-dimensional Tree)算法具有此查找功能[18],能够查找各个数据点的空间邻域点。

Kd - Tree 算法是在二叉索引树的基础上,经过扩展后应用于 K 维($K \geqslant 2$)空间中最邻近元素快速查找的高效算法。为了能够得到均匀的点云空间,使用 Kd - Tree 算法对点云空间进行划分,也提高了点云空间邻域点的搜索速度。Kd - Tree 算法在各



(a) RGB彩色图像1 (b) 深度图像1

(c) RGB彩色图像2 (d) 深度图像2

图 4 Kinect 相机获取的土壤表面图像

Fig. 4 Images of soil surface acquired by Kinect camera

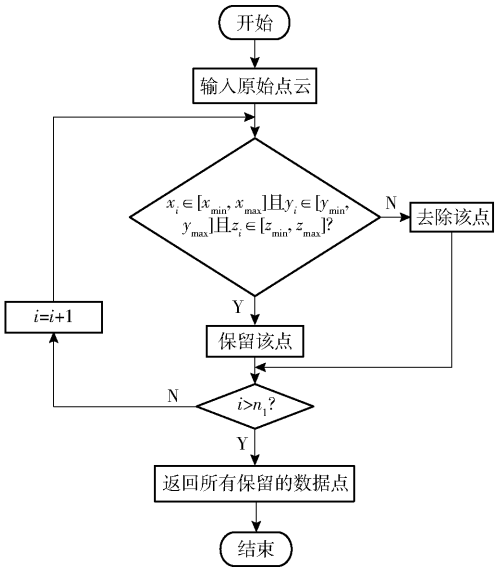


图 5 去除无用背景的流程

Fig. 5 Process to remove useless background

个内部节点中，利用与坐标系中各轴平行的 $K-1$ 维的超平面（如三维空间中的矩形面，二维空间中的线段）对 K 维的点空间进行交替分割，分割时需要同时保证每个分割的子空间都至少包含一个数据点，以避免空间的浪费。

利用 Kd－Tree 搜索算法寻找点云时，任一点云 $p_i(x_i,y_i,z_i)(i=1,2,\cdots,n_2)$ 查找的主要对象是其空间临近点 $p_j(x_j,y_j,z_j)(j=1,2,\cdots,k)$。$p_i$ 临近点的平均距离 d_i、全局距离平均值 μ 以及标准差 w 为

$$d_i=\frac{1}{k}\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2+(z_i-z_j)^2} \quad (1)$$

$$\mu=\sum_{i=1}^{n_2}\frac{1}{n_2}d_i \quad (2)$$

$$w=\sqrt{\frac{1}{n_2}\sum_{i=1}^{n_2}(d_i-\mu)^2} \quad (3)$$

将距离 d_i 在 $[u-\alpha w,u+\alpha w]$ 之外的点定义为离群噪声点，并将其从点云集中去除。根据目标点云的数量以及密度选择参数 α 以及临近点个数 k。根据获取的点云进行预备实验，当 k 为 60、α 为 2.0 时滤波效果较好。离群滤波流程如图 6 所示。

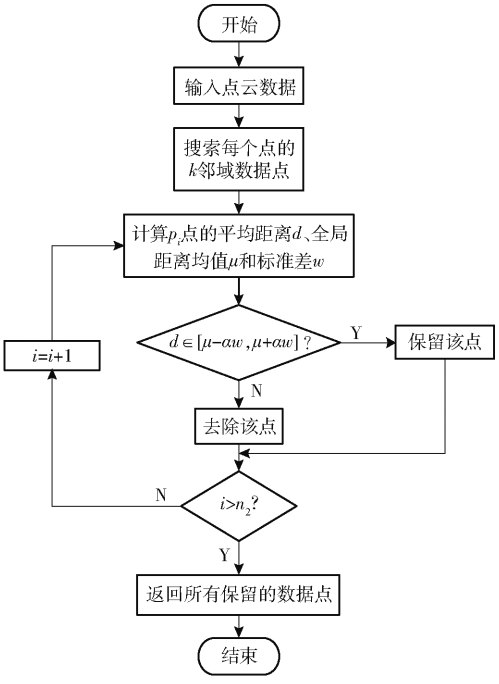


图 6　离群滤波流程图

Fig. 6　Flow chart of outlier filtering

1.3　土壤表面三维点云的配准

去除土壤表面无用背景和噪声后，需对土壤表面进行初始配准和精确配准。对土壤表面进行配准时，由于传统的 ICP 算法适于对存在包含关系且相邻的两片点云进行精确配准，当两片点云只是部分重合且空间位置差异较大，此时传统的 ICP 算法很容易因为初值选择不当而陷入局部最优[19]。本文采用点云初始配准的方法，使得两片点云在经过处理后能够获得较优的空间位置，之后再使用 ICP 算法对土壤表面的点云进行精确配准。首先对获取的土壤表面点云信息进行归一化对齐径向特征（Normal aligned radial feature，NARF）关键点的搜索，得到具有代表性且比较均匀的点云关键点[20]，然后根据关键点特征值对相邻的 2 片点云之间的空间映射关系进行评估。提取关键点特征值采用快速点特征值直方图（Fast point feature histograms，FPFH）的方法[21]；采用随机抽样一致性（Random sample consensus，RANSAC）的方法[22]提纯映射关系，再求取 2 片点云之间的空间转换参数（旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 和平移向量 $\boldsymbol{T}$），最后利用转换的参数将 2 片点云转换到同一个空间的坐标系下。土壤表面点云的初始配准流程如图 7 所示。

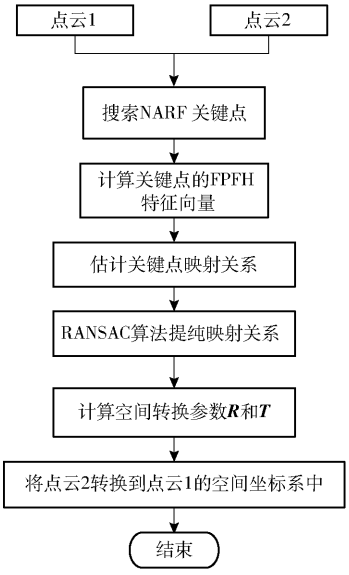


图 7　土壤表面点云初始配准流程

Fig. 7　Flow chart of initial registration of soil surface point cloud

其中 NARF 关键点搜索是为了利用少量的数据计算量体现较多的点云特性，减少点云特征提取时的搜索空间和计算时间。在搜索 NARF 关键点时，还需确保在点云的同一位置处被检测到。

使用 FPFH 是为了求解关键点的特征向量，FPFH 基于点云空间中 k 邻域内所有点之间相互的空间位置关系估计样本表面的变化情况，以描述样本的几何特征。

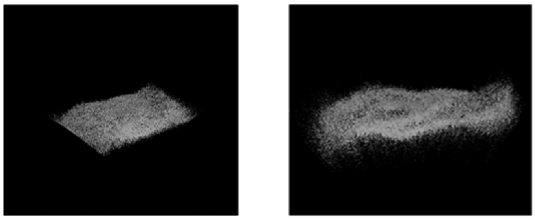
RANSAC 算法是一种随机抽样一致性算法，它基于不断迭代的方式对包含异常点的数据集的数学模型进行最优估计。利用它对映射关系进行提纯时，需要从样本中进行随机抽样，并且通过抽样的 2 片点云的空间关键点的映射关系完成 2 片点云之间空间转换。

利用 ICP 算法对土壤表面进行精确配准。ICP 算法是目前广泛用于三维重建的一种算法,这种算法的点云匹配精度较高。ICP 算法的运行速度很大程度上取决于给定的两片点云的初始位置,当给定的两片点云之间存在了包含关系且位置距离上比较近,ICP 算法可以很好地对这两片点云进行精确配准。但当土壤表面的空间点云有部分重合或者空间位置有差异时,ICP 算法很容易因为初值的选择不当而陷入局部最优,影响点云匹配的精确度。因此,本文提出了改进的方法对土壤表面的点云进行初始配准。

2 结果与分析

2.1 土壤表面点云获取与预处理

使用 Kinect 相机获取到彩色图像和深度图像后,需要通过处理才能获取到土壤表面原始的三维点云信息,图 8 为土壤表面形状不同的两处(图 4)的土壤表面原始三维点云信息,即土壤表面原始的三维点云图像。



(a) 图像1 (b) 图像2

图 8 土壤表面原始三维点云图像

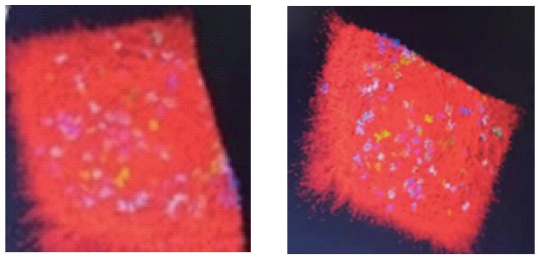
Fig. 8 Original 3D point cloud images of soil surface

利用 ICP 算法对经过初试配准的 2 片点云进行精准配准,很大程度上提高了配准的精确度。

土壤表面原始三维点云中包含不稳定的噪声点,以及一些冗余的背景信息,需对原始三维点云进行背景去除以及相关的离群滤波等预处理,进而得到比较准确的相关点云数据,然后对两片点云进行 NARF 关键点的搜索以及使用 FPFH 和 RANSAC 算法来最终得到它们之间的空间映射关系,最终完成点云的初始配准和精准配准。图 9 为土壤表面形状不同的两处(图 4)的土壤表面精确配准的结果。

2.2 土壤表面三维点云误差分析

由于 Kinect 相机拍摄环境以及实验平台搭建等的影响,以及在对土壤表面进行三维点云配准时,采样点为 50 个,配准样本数为 50 个,样本数有限,



(a) 图像1 (b) 图像2

图 9 土壤表面精准配准三维点云图像

Fig. 9 Accurately registered 3D point cloud images on soil surface

这些因素都会使得到的土壤表面的三维点云数据受到影响。为了定量分析点云配准算法精确度,采用点云配准和对应点之间的平均欧氏距离作为点云配准误差的评估标准。通过分析实验结果可得,当对应点间的距离越大,配准的精确度就会越低,反之配准精确度会越高。点云配准误差如表 2 所示。

表 2 点云配准误差

Tab. 2 Error of point cloud registration

配准方法	配准时间/s	点云数量	配准误差/cm
传统 ICP	58.2	60 178	3.80
NARF - ICP	124.8	60 183	0.89

由表 2 可得,采用改进的 NARF - ICP 相比于传统 ICP,虽配准时间稍长,但误差降低了 2.91 cm,提高了土壤表面点云的配准精确度。

3 结论

(1)通过对原始的土壤表面三维点云图像进行阈值设置以及预处理,实现了滤波和背景噪声等处理,获取了较为精准的土壤表面三维点云数据。

(2)通过对土壤表面进行初始配准、精确配准,实现了土壤表面的三维重建。对土壤表面原始的三维点云进行初始配准时,进行了误差判断,调节了初始的配准参数,最小化累计配准误差。利用 NARF、FPFH、RANSAC 方法可以很好地提取到 2 片点云的映射关系,可以对空间中的任意 2 片点云进行配准,大大提高了点云配准精确度。

(3)传统 ICP 算法的配准时间是 58.2 s,配准误差是 3.80 cm,改进后的 NARF - ICP 算法配准时间为 124.8 s,配准误差为 0.89 cm。相比传统 ICP 算法,改进后方法的配准时间虽延长了 66.6 s,但配准误差降低了 2.91 cm。

参 考 文 献

[1] 吴剑锋,蒋濛婷,马梦鑫,等. 基于点云融合算法的 Kinect 三维重建技术及其应用研究[J]. 计算机应用软件,2018,35(8):260 - 264.

WU Jianfeng, JIANG Mengting, MA Mengxin, et al. Kinect 3D reconstruction technology based on point cloud fusion algorithm

and its application[J]. Computer Applications and Software, 2018, 35(8):260 - 264. (in Chinese)
[2] TRIPICCHIO P, SATLER M, DABISIAS G, et al. Towards smart farming and sustainable agriculture with drones[C]// International Conference on Intelligent Environments. IEEE, 2015.
[3] HALL F G, BERGEN K, BLAIR J B, et al. Characterizing 3D vegetation structure from space: mission requirements[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(11):2753 - 2775.
[4] 郭连朋,陈向宁,徐万朋,等. 基于 Kinect 传感器的物体三维重建[J]. 四川兵工学报,2014,35(11):119 - 123.
GUO Lianpeng, CHEN Xiangning, XU Wanpeng, et al. Three-dimensional reconstruction of objects based on Kinect sensor[J]. Journal of Sichuan Armed Forces, 2014, 35(11):119 - 123. (in Chinese)
[5] 郭连朋,陈向宁,刘彬,等. 基于 Kinect 传感器多深度图像融合的物体三维重建[J]. 应用学,2014,35(5):811 - 816.
GUO Lianpeng, CHEN Xiangning, LIU Bin, et al. Three-dimensional reconstruction of objects based on Kinect sensor multi-depth image fusion[J]. Applied Optics, 2014, 35(5):811 - 816. (in Chinese)
[6] 兰羽,周茜. 激光外差探测中外差信号检测方法研究[J]. 国外电子测量技术,2012,31(4):38 - 41.
LAN Yu, ZHOU Qian. Research on detection method of heterodyne signal in laser heterodyne detection[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2012, 31(4):38 - 41. (in Chinese)
[7] 洪占勇. 车轮热轧轮胚尺寸激光测量仪的研究[C]//2009 全国虚拟仪器大会,2009.
[8] 徐元柳. 基于裸露地表辐射传输模型的粗糙度反演与地形校正[D]. 北京:中国地质大学, 2009.
XU Yuanliu. Roughness inversion and terrain correction based on bare surface radiation transmission model[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009. (in Chinese)
[9] 计璐艳,耿修瑞,赵永超. 基于土壤显微图像时间序列的三维重建方法[J]. 电子测量技术,2013,36(8):61 - 64.
JI Luyan, GENG Xiurui, ZHAO Yongchao. Three-dimensional reconstruction method based on time series of soil microscopic images[J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(8):61 - 64. (in Chinese)
[10] NEWCOBE R A, IZADI S, HILLIGES O, et al. KinectFusion: real-time dense surface mapping and tracking[C]//2011 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. IEEE Computer Society, 2011.
[11] CATUHE D. Programming with the Kinect for windows software development kit[M]. Redmond: Microsoft Press, 2012:55 - 59.
[12] SHUM H P H, HO E S L, JIANG Y, et al. Real-time posture reconstruction for microsoft Kinect[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2013, 43(5):1357 - 1369.
[13] LIM Y W, LEE H Z, YANG N E, et al. 3-D reconstruction using the Kinect sensor and its application to a visualization system[C]//IEEE International Conference on Systems. IEEE, 2012.
[14] 余涛. Kinect 应用开发实战:用最自然的方式与机器对话[M]. 北京:机械工业出版社,2013:20 - 59.
[15] GAI J, TANG L, STEWARD B. Plant recognition through the fusion of 2D and 3D images for robotic weeding[C]//2015 ASABE Annual International Meeting, 2015.
[16] RUSU R B, COUSINS S. 3D is here: point cloud library[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011, 47(10):1 - 4.
[17] 周炳南,闵华松,康雅文. PCL 环境下的 3D 点云分割算法研究[J]. 微电子学与计算机,2018,35(6):101 - 105.
ZHOU Bingnan, MIN Huasong, KANG Yawen. Research on 3D point cloud segmentation algorithm in PCL environment[J]. Microelectronics & Computer, 2018, 35(6):101 - 105. (in Chinese)
[18] 郑立华,麦春艳,廖崴,等. 基于 Kinect 相机的苹果树三维点云配准[J]. 农业机械学报,2016,47(5):9 - 14.
ZHENG Lihua, MAI Chunyan, LIAO Wei, et al. Three-dimensional point cloud registration of apple tree based on Kinect camera[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):9 - 14. (in Chinese)
[19] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2):239 - 256.
[20] STEDERR B, RUSU R B, KONOLIGE K, et al. Point feature extraction on 3D range scans taking into account object boundaries[C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 2011.
[21] RUSU R B, BLODOW N, BEETZ M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration[C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009:1848 - 1853.
[22] FISCLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: aparadigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6):381 - 395.