

基于目标特征的植株深度图像修复

陈国军, 程 琰, 曹 岳, 李 胜

(中国石油大学(华东)计算机与通信工程学院, 山东 青岛 266580)

摘 要: 针对植株深度图像的像素错误和缺失、常见的滤波方法无法准确修复植株深度图像的问题, 提出一种基于目标特征的植株深度图像修复方法。首先基于颜色和空间信息的图像分割算法对植株彩色图像进行目标分割, 再检索每个目标的外轮廓, 并对外轮廓进行多边形拟合; 其次, 基于目标区域搜索深度图像中具有正确深度值的像素作为目标区域采样点, 并对叶片区域的图像进行归一化; 最后, 利用空间拟合法计算各目标区域的方程, 修复区域内小面积错误和缺失的深度值, 同时采用支持向量机和空间变换运算对大面积错误和缺失深度值的叶片区域进行修复。实验结果表明, 该方法能够准确地修复植株深度图像中错误、缺失的深度数据, 且能够有效地保护目标区域的边缘信息。

关 键 词: 植株深度图像修复; 目标分割; 空间拟合; 支持向量机; 空间变换运算

中图分类号: TP 391

DOI: 10.11996/JGj.2095-302X.2019030460

文献标识码: A

文章编号: 2095-302X(2019)03-0460-06

Plant Depth Maps Recovery Based on Target Features

CHEN Guo-jun, CHENG Yan, CAO Yue, LI Sheng

(College of Computer and Communication Engineering, China University of Petroleum, Qingdao Shandong 266580, China)

Abstract: Considering the depth images of plants provided by depth camera are incomplete, and common filtering methods cannot inpaint the plant depth images accurately, we propose a plant depth images inpainting method which is based on target features. Firstly, targets of plant color images are segmented by using a color image segmentation algorithm based on color and spatial information, then the outer contour of each target is retrieved, and polygon for each outer contour is fitted. Secondly, the pixels with correct depth value in the depth images are searched to act as sampling points, and meanwhile the leaf maps are normalized. Finally, using spatial fitting method to calculate every target area's equation to correct the small area's depth pixels which need to be corrected. In the meantime, support vector machine and spatial transformation are used to get the accurate large area's depth pixels which need to be corrected. The experiments show that the proposed method achieves better performance for plant depth image inpainting, and protects targets' edge information.

Keywords: plant depth image inpainting; target segmentation; spatial fitting; support vector machine; spatial transformation

在计算机图形学、计算机视觉领域中, 三维数据可应用在 3D 打印、文物修复、三维重建等众

多领域中。随着深度相机的问世, 三维数据的获取也更加简便。然而, 深度相机在采集深度图像

收稿日期: 2018-11-12; 定稿日期: 2018-11-26

基金项目: 国家“863”计划主题项目子课题(2015AA016403); 虚拟现实技术与系统国家重点实验室(北京航空航天大学)开放基金(BUAA-VR-15KF-13)

第一作者: 陈国军(1968-), 男, 江苏如东人, 副教授, 博士, 硕士生导师。主要研究方向为图形图像处理、虚拟现实及科学可视化等。

E-mail: chenggj@upc.edu.cn

时,往往受到自身传感器、与物体间的距离、物体表面的平整度等因素影响,导致获取的深度数据错误和缺失,这些错误的深度数据往往直接应用到交互中,降低了应用的准确性。因此修复深度图像中错误和缺失的深度数据是当前亟待解决的课题之一。

目前常见的修复空洞方法有滤波法、目标特征法。滤波法是应用最广泛的深度图像修复法,改进的滤波算法^[1-4]对于形状规则无遮挡的三维物体有着良好的修复效果,但对于不规则三维物体的深度数据的修复效果并不乐观。CHEN 等^[5]采用彩色图引导、区域自适应、深度选择框架,使用2个局部滤波器对深度图像进行滤波,能够有效地保持目标边界的深度像素,但对于目标内部缺失的深度数据尚无法准确修复;WASZA 等^[6]通过归一化卷积和引导滤波修复多帧图像的深度数据,由于只利用深度图像,处理的结果仍受限制;徐欢和郑江滨^[7]利用深度数据之间的相关性,同时结合彩色图像,通过改进的双边滤波器填补深度图像中的空洞,但针对较大面积的空洞修复效果仍不理想;吴倩等^[8]结合彩色图像局部分割,利用引导滤波对深度图像进行平滑、去噪,但该算法针对同色不同距的空洞修复存在不足。

此外,众多学者基于三维物体的特征提出修复方法。LI 等^[9]利用前后帧的物体连贯性关系,对缺失的曲面片进行填充,但未实现从全局来找空洞表面的关系;SUNG 等^[10]基于数据驱动技术,通过已知的数据集和物体的对称性补全三维数据,然而无法解决存在遮挡关系的三维物体的深度数据补全;沈跃等^[11]基于 K-means 和近邻回归算法对植株深度图像进行修复,能够较好地修复叶片边缘的空洞,但对于叶片内部空洞修复效果不佳;高雅平等^[12]在深度图像上引入 RGB 图像搜索候选最优匹配块,结合 Criminisi 算法,填补深度图像的空洞,针对人物姿态平滑有着良好的修复效果,但对于复杂物体的修复效果尚不理想。

在层次结构复杂、不规则的三维物体中,植株是一个典型样例。本文充分利用植株的彩色图像信息、已知的深度数据、叶片的特征信息对植株深度图像进行修复,提出基于目标特征的植株深度图像修复方法。

1 植株图像预处理

在预处理阶段,将植株的彩色图像作为引导,

对彩色图像进行目标分割,再检索每个目标的外轮廓,并进行多边形拟合;其次,基于目标区域搜索深度图像中具有正确深度值的像素作为目标区域采样点,并对深度数据正确的完整叶片区域图像进行归一化处理,为后续修复提供数据基础。

1.1 植株彩色图像预处理

采用基于颜色和空间信息的图像分割算法^[13]对彩色图像进行目标分割,将1幅植株的源彩色图像 S 分割为 n 幅彩色图像,如叶、茎、花盆、背景墙等多个不同目标的彩色图像,并进行标记,目标图像集记为 $T=\{t_i|i=1,2,\cdots,n\}$, t_i 为第 i 个目标图像。目标分割后的各区域彩色图像如图1所示。

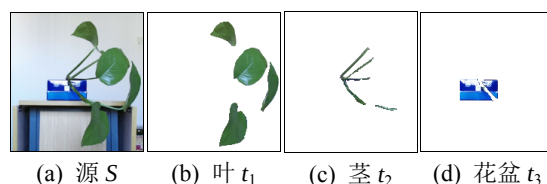


图1 目标分割后的各区域彩色图像

目标分割后,采用 SUZUKI 和 BE^[14]提出的基于边界跟随的拓扑结构分析数字二值图像算法,提取目标图像 t_i 中每个连通区域的外轮廓点集,基于 Douglas-Peucker 算法计算拟合的多边形点集。算法流程如下:

(1) 将目标图像转换为灰度图像,再逐行扫描,直到遇到连通区域的一个点,以其为起始点并跟踪轮廓,标记边界上的像素。当轮廓完整闭合时,扫描回到上一个位置,直到再次发现新的区域。其中,提取的外轮廓点集记作 $C=\{c_i=\{c_{ij}|j=1,2,\cdots,n\}|i=1,2,\cdots,n\}$, c_{ij} 为目标图像 t_i 的第 j 个外轮廓。此外,目标区域集表示为 $TC=\{tc_i=\{tc_{ij}|j=1,2,\cdots,n\}|i=1,2,\cdots,n\}$,目标区域 tc_{ij} 为外轮廓 c_{ij} 内部的全部像素。

(2) 以 rd 为径向距离在每个外轮廓 c_{ij} 上选取有限个数的点,并将其依次连接为折线,完成每个外轮廓 c_{ij} 的多边形拟合,拟合的多边形点集记为 $P=\{p_i=\{p_{ij}|j=1,2,\cdots,n\}|i=1,2,\cdots,n\}$ 。

目标图像 t_1 的外轮廓点集 $c_1=\{c_{1j}|j=1,2,3,4\}$ 和多边形点集 $p_1=\{p_{1j}|j=1,2,3,4\}$ 如图2所示,白色表示外轮廓点集,圆圈表示拟合的多边形点集。

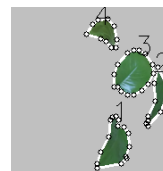


图2 t_1 的外轮廓点集及多边形点集

1.2 采样点提取及归一化处理

准确的采样点是进行空间拟合的重要数据基础,为了提取目标区域内的采样点,基于逐行扫描算法搜索目标区域中的像素点,并设定深度阈值 Th_d 用以判断深度图像在 (x,y) 处的像素值 z 是否准确。采样点提取的具体步骤如下:

(1) 基于逐行扫描算法,将目标区域 tc_{ij} 内的像素坐标 (x,y) 映射至 tc_{ij} 所对应的深度图像,判别深度图像在 (x,y) 处的像素值 z 是否准确;

(2) 若映射至深度图像的 (x,y) 处的像素值 z 准确(即 $z \neq 0$, 且满足 Th_d),则该像素为区域 tc_{ij} 内的采样点,区域 tc_{ij} 内的采样点集记作 $SampP_{ij} = \{(x,y,z) | (x,y,z) \in tc_{ij}\}$;

(3) 若映射至深度图像的 (x,y) 处的像素值 z 不准确(即 $z=0$, 或不满足 Th_d),则该像素为区域 tc_{ij} 内的待修复像素,并将该像素值 z 设为 0,区域 tc_{ij} 内的待修复像素点集记作 $RepP_{ij} = \{(x,y,0) | (x,y,0) \in tc_{ij}\}$ 。

此外,对叶片区域 tc_{ij} 进行归一化处理,便于后续进行特征提取及训练。

2 植株深度图像修复

本文将植株深度图像修复分为:基于空间拟合的植株深度图像修复、基于 SVM 和空间变换运算的植株深度图像修复。设定一个阈值 Th_r ,用以确定目标区域 tc_{ij} 采用何种修复方法, Th_r 设定为 0.3 (这是由于人为删除 0.3 倍及以上的采样点个数后,拟合出的空间方程的均方根误差大于 0.5,拟合效果不佳)。判别步骤如下:

(1) 当目标区域 tc_{ij} 的待修复像素点的个数与区域 tc_{ij} 内的全部像素点个数的比值小于 Th_r 时,即

$$\frac{|RepP_{i,j}|}{|SampP_{i,j}| + |RepP_{i,j}|} < Th_r \quad (1)$$

此时区域内存在小面积错误、缺失的像素,采样点集 $SampP_{ij}$ 的个数多,待修复像素点适宜采用基于空间拟合的方法对植株深度图像的目标区域 tc_{ij} 进行修复;

(2) 当目标区域 tc_{ij} 的待修复像素点的个数与区域 tc_{ij} 内的全部像素点个数的比值大于等于 Th_r 时,即

$$\frac{|RepP_{i,j}|}{|SampP_{i,j}| + |RepP_{i,j}|} \geq Th_r \quad (2)$$

此时区域内存在大面积错误、缺失的像素,采样点集 $SampP_{ij}$ 的个数少,拟合出的方程无法有效表述区域的曲面特征,此时待修复像素点适宜采用基于 SVM 和空间变换运算对植株深度图像的目标区域 tc_{ij} 进行修复。

2.1 基于空间拟合的植株深度图像修复

针对小面积错误、缺失深度数据的区域,利用空间拟合法计算该目标区域的方程,进而计算待修复像素的深度值,以修复该区域中小面积错误、缺失的深度数据。修复步骤如下:

(1) 本文采用 2 种方程对区域采样点进行拟合:

①在平面拟合中,平面方程表示为

$$z = a_1x + a_2y + a_3 \quad (3)$$

②在二次曲面拟合中,曲面方程表示为

$$z(x,y) = a_1x^2 + a_2y^2 + a_3xy + a_4x + a_5y + a_6 \quad (4)$$

(2) 区域 tc_{ij} 的采样点集 $SampP_{ij}$ 拟合平面方程式(3)或曲面方程式(4),根据最小二乘原理^[15],需使得对应的偏差的加权平方和

$$S_1 = \sum_{k=1}^n (a_1x_k + a_2y_k + a_3 - z_k)^2 \quad (5)$$

$$S_2 = \sum_{k=1}^n (a_1x_k^2 + a_2y_k^2 + a_3x_ky_k + a_4x_k + a_5y_k + a_6 - z_k)^2 \quad (6)$$

有极小值,应满足式(5)和式(6)对 a_m 的偏导数为 0,即

$$\frac{\partial S_1}{\partial a_m} = 0, m=1,2,3 \quad (7)$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial a_m} = 0, m=1,2,3,4,5,6 \quad (8)$$

(3) 将采样点集 $SampP_{ij}$ 代入式(7)和式(8),解得 a_m ,得到目标区域 tc_{ij} 所对应的平面/曲面方程,并计算 2 个方程的标准差,标准差最小的方程记为待修复区域 tc_{ij} 最终的方程 E_{ij} 。

(4) 将待修复像素点集 $RepP_{ij}$ 代入上一步所解得的方程 E_{ij} ,计算 z 值,再映射至深度图像 (x,y) 处,把该位置原本错误、缺失的深度数据替换为 z ,以修复该位置的深度数据。

2.2 基于 SVM 和空间变换的植株深度图像修复

由于同种植株的叶片在一定尺度上呈现相似性,且空间拟合法无法准确地修复叶片内部大面积错误、缺失深度数据的情况,因此利用叶与叶之间的相似性特点,提出基于 SVM 和空间变换运算的植株深度图像修复法以修复叶片内部大面积错误、缺失深度数据的区域。

2.2.1 特征提取及 SVM 模型训练

为了训练可靠的模型,需提取叶片特征,并对特征值进行归一化处理。提取的叶片特征有:

- (1) 最长轴长, p_{ij} 上距离最大的 2 个像素点的连线;
- (2) 长宽比率, p_{ij} 最小外接矩形的长/ p_{ij} 最小外接矩形的宽;
- (3) 最宽轴长,与最长轴垂直且距离最大的 2 个像素点的连线;
- (4) 矩形度,区域面积与外接矩形面积之比;
- (5) 周长,树叶外轮廓点 c_{ij} 的个数。

本文用于训练和预测的样本数据来源于自采集库,其中 120 幅叶片图像用作训练,60 幅叶片图像用作测试,样本集的部分图像如图 3 所示。

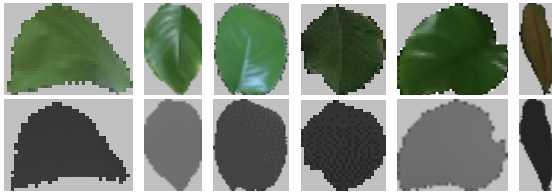


图3 样本集的部分图像

为了便于后期进行更多种类植株深度图像的修复以及特征维数的扩展,本文选用 SVM 模型进行待修复叶片所属类别的检索。SVM 模型训练的步骤如下:

- (1) 输入 120 张待训练的彩色图像以及每张图像对应的特征和标签;
- (2) 初始化训练参数,再利用自动训练函数 `train_auto()` 自动优化训练参数值;
- (3) 进行训练,并保存训练后的模型;
- (4) 输入 60 张测试集的彩色图像及每张图像对应的树叶特征,利用第(3)步获得的模型对测试集进行测试,计算模型预测树叶类别的准确率。

2.2.2 预测与修复

加载已训练的 SVM 模型,输入待修复叶片区域的彩色图像,提取特征,根据 SVM 模型预测出该树叶的类别,再对待修复叶片与该类别的树叶图像进行相似性度量,检索出与目标区域图像匹配最优的叶片。再将最佳匹配的叶片彩色图像映射至该样本所对应的深度图像,根据最佳匹配叶片和待修复叶片的空间关系计算出几何变换矩阵,采用空间变换运算,计算出准确的深度值,以修复大面积错误、缺失深度数据的区域。修复过程如下:

- (1) 计算最佳匹配叶片图像和待修复叶片图像

的 SURF 特征,计算单映射矩阵。

- (2) 计算最佳匹配叶片的最长轴长与待修复叶片最长轴长的比值 R_l 、最佳匹配叶片的最宽轴长与待修复叶片最宽轴长的比值 R_w 、最佳匹配叶片的平均深度与待修复叶片的平均深度的比值 R_d ,以上 3 个比值作为空间变换运算的放缩比例。

- (3) 根据已知的数据和步骤(1)和步骤(2)计算的值,构造 2 个叶片曲面的几何变换矩阵 T_{3D} 。设几何变换矩阵 T_{3D} 为

$$T_{3D} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \quad (9)$$

- (4) 将最佳匹配样本的采样点 (x,y,z) 代入公式(10)与几何变换矩阵 T_{3D} 相乘,计算得到待修复像素 (x',y') 所对应的 z' 值,将该位置原本错误、缺失的深度数据替换为 z' ,以修复该位置的深度数据,即

$$(x',y',z',1) = (x,y,z,1)T_{3D} \quad (10)$$

3 实验结果与分析

本文实验使用的电脑配置为 i7-6700HQ CPU, 2.60 GHz 主频, 8.00 GB 内存, NVIDIA GeForce 940MX 显卡;图像采集设备为 Kinect 2.0 深度相机;使用的开发工具为 VS2015、MATLAB;开发库为 OpenCV。

为了验证本文方法的有效性,实验使用的数据为自采集的绿萝 1、玉兰树、榕树、经人工删除某叶片深度数据的绿萝 2,4 种图像分别采用对于小面积缺失深度数据的区域有着良好修复效果的基于联合双边滤波的深度图像修复方法^[16]、对规则物体内部大面积缺失深度数据的区域有着良好修复效果的基于快速行进的深度图像修复方法^[17]和本文方法进行修复。绿萝 1 和玉兰树的叶片稀疏,榕树的叶片繁多且密集,经人工删除某叶片深度数据的绿萝 2 图像以验证基于 SVM 和空间变换运算的植株深度图像修复效果,4 种图像基于 3 种修复方法的对比实验以验证本文方法的可行性。图 4 分别给出了 3 种修复方法对 4 种深度图像进行修复的对比实验结果。

从图 4 可以看出,联合双边滤波算法(joint bilateral filter, JBF)利用彩色图像的完整边缘信息对深度图像进行校正,能够有效地保持边缘信息,填补较大面积的空洞,但该算法针对叶片繁多的植

株深度图像时会受其彩色图像的影响，所界定的边界不准确，以致原本正确的深度数据替换为错误的深度数据；基于快速行进(fast marching method, FMM)的修复方法能够填补目标内部较大面积缺失的深度数据，但无法准确修复目标轮廓处的深度数据，且在边缘处易出现模糊情况。此外，JBF

算法和 FMM 算法均无法对植株的细小空洞区域(如茎)进行准确地修复；而本文方法对于深度图像中出现的错误、缺失的深度数据有着良好的修复效果，且既能够有效地保持目标区域的边缘信息，同时也能够对植株的细小空洞区域进行准确地修复。

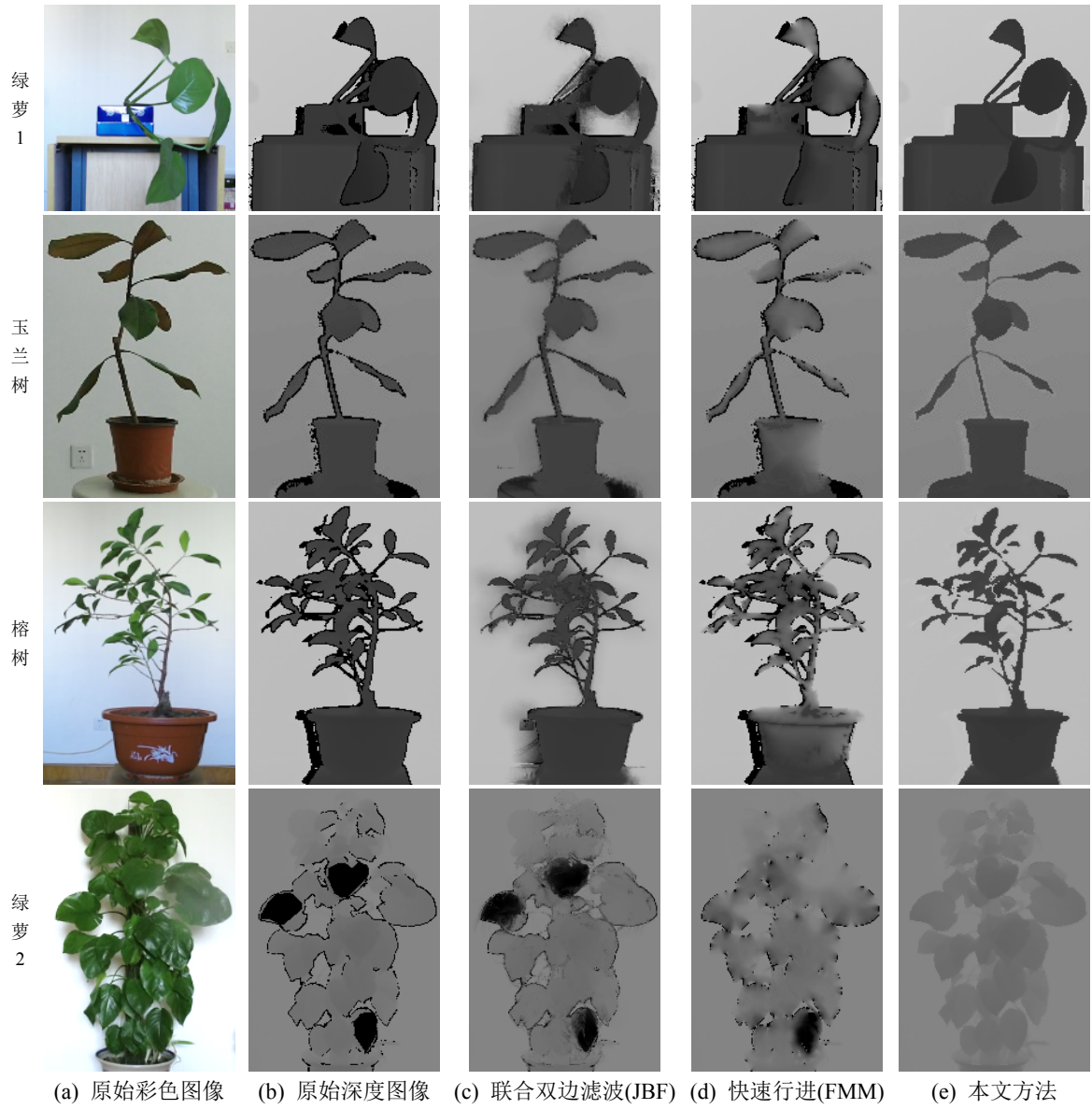


图 4 3 种植株的深度图像修复结果比较

为验证基于 SVM 和空间变换运算的植株深度图像修复方法的精度，对人工删除深度数据的“绿萝 2”图像中大面积缺失深度数据的 3 个叶片进行了修复精度的计算，叶片深度信息的修复精度为：“删除深度数据后经修复且正确的深度信息个数”与“删除深度数据前正确的深度信息个数”之比。

修复精度由表 1 可以看出，本文方法的深度信息修复精度较 JBF 和 FMM 算法有很大的提升，对大面积缺失深度数据的叶片区域能够有效地修复。

表 1 绿萝 2 的叶片深度信息修复精度

图像		修复方法		
		JBF	FMM	本文
叶片 1		0.422 863	0.862 752	0.965 468
叶片 2		0.382 131	0.834 230	0.954 690
叶片 3		0.492 031	0.657 584	0.983 209

由于缺少植株深度图像标准数据集，因此在量

化评估的实验中,未使用存在错误的原始深度图像进行量化,而是对深度图像中原本正确的深度像素进行人为删除,再分别采用 JBF、FMM、本文提出方法进行修复,将修复后的像素区域与人为删除前的正确像素区域进行量化评估比较。评估参数为峰值信噪比 PSNR 和均方根误差 RMSE,量化评估结果见表 2,其结果表明,与 JBF 算法和 FMM 算法相比,经本文方法处理后的深度图像 PSNR 值增加、RMSE 值降低,验证本文方法的修复效果更佳。

表 2 3 种修复方法的量化评估结果比较

图像		修复方法		
		JBF	FMM	本文
绿萝 1	PSNR	41.868 164	42.510 660	43.338 159
	RMSE	2.056 515	1.909 885	1.736 330
玉兰树	PSNR	46.388 856	55.827 096	56.595 697
	RMSE	1.222 074	0.412 273	0.377 360
榕树	PSNR	41.951 086	46.982 981	53.054 797
	RMSE	2.036 76	1.141 277	0.567 284
绿萝 2	PSNR	22.379 096	27.127 013	40.224 703
	RMSE	19.390 337	11.225 082	2.484 878

4 结 论

针对深度相机采集到的植株深度数据错误、缺失的问题,提出基于目标特征的植株深度图像修复方法,该方法充分利用植株彩色图像信息、已知的深度数据、叶片的特征信息对植株深度图像进行修复。通过与 JBF 算法、FMM 算法进行比较实验,实验结果表明本文方法的修复效果更佳,不仅能够有效地保护目标区域的边缘信息,准确地修复植株深度图像中错误、缺失的深度数据,对于大面积缺失深度数据的区域和细小空洞区域(如茎)也有着良好的修复效果,为植株物体进行三维重建提供重要的数据基础。

目前,还需扩展树叶的数据集,从多个角度采集植株图像,采集多种室内植株图像,同时,增加提取的特征维数,以修复更多种类、更多角度的植株深度图像。

参 考 文 献

- [1] CAMPLANI M, SALGADO L. Adaptive spatiotemporal filter for low-cost camera depth maps [C]//2012 IEEE International Conference on Emerging Signal Processing Applications. New York: IEEE Press, 2012: 33-36.
- [2] CAMPLANI M, SALGADO L. Efficient spatio-temporal hole filling strategy for kinect depth maps [EB/OL]. [2018-10-11]. <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spice/8290/1/Efficient-spatio-temporal-hole-filling-strategy-for-Kinect-depth-maps/10.1117/12.911909.full?SSO=1>.
- [3] MATYUNIN S, VATOLIN D, BERDNIKOV Y, et al. Temporal filtering for depth maps generated by Kinect depth camera [EB/OL]. [2018-09-21]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5877202>.
- [4] LIU W, XUE H Y, GU Y, et al. Shape preserving RGB-D depth map restoration [C]//International Conference on Neural Information Processing 2014. Berlin: Springer, 2014: 150-158.
- [5] CHEN C Y, CAI J F, ZHENG J M, et al. Kinect depth recovery using a color-guided, region-adaptive, and depth-selective framework [J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2015, 6(2): 1-19.
- [6] WASZA J, BAUER S, HORNEGGER J. Real-time preprocessing for dense 3-D range imaging on the GPU: Defect interpolation, bilateral temporal averaging and guided filtering [C]//2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops. New York: IEEE Press, 2011: 1221-1227.
- [7] 徐欢, 郑江滨. Kinect 深度图像修复算法[J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(11): 98-103.
- [8] 吴倩, 史晋芳, 王德娇, 等. 结合彩色图像局部分割的 Kinect 深度图修复算法[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(12): 3852-3854, 3884.
- [9] LI H, LUO L J, VLASIC D, et al. Temporally coherent completion of dynamic shapes [J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(1): 1-11.
- [10] SUNG M, KIM V G, ANGST R, et al. Data-driven structural priors for shape completion [J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(6): 1-11.
- [11] 沈跃, 徐慧, 刘慧, 等. 基于 K-means 和近邻回归算法的 Kinect 植株深度图像修复[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 188-194.
- [12] 高雅平, 陈一民, 邹一波, 等. 优化改进的深度图像空洞填补算法[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(11): 3040-3044.
- [13] 叶齐祥, 高文, 王伟强, 等. 一种融合颜色和空间信息的彩色图像分割算法[J]. 软件学报, 2004, 15(4): 522-530.
- [14] SUZUKI S, BE K. Topological structural analysis of digitized binary images by border following [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985, 30(1): 32-46.
- [15] 曾清红, 卢德唐. 基于移动最小二乘法的曲线曲面拟合[J]. 工程图学学报, 2004, 25(1): 84-89.
- [16] 李知菲, 陈源. 基于联合双边滤波器的 Kinect 深度图像滤波算法[J]. 计算机应用, 2014, 34(8): 2231-2234, 2242.
- [17] 孟恬, 全红艳. 基于快速行进算法的深度图像增强算法[J]. 计算机应用与软件, 2017(8): 232-237.