湖南农业大学学报(自然科学版)　2025，51(3)：110–116．DOI：10.13331/j.cnki.jhau.2025.03.014
Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)

引用格式：
梅育成，邹一波，李佳毅，徐瑜，陈明，葛艳．基于三维点云的红掌器官分割与表型分析[J]．湖南农业大学学报(自然科学版)，2025，51(3)：110–116．
MEI Y C, ZOU Y B, LI J Y, XU Y, CHEN M, GE Y. Segmentation and phenotypic analysis of anthurium organs based on three-dimensional point cloud[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(3): 110–116.
投稿网址：http://xb.hunau.edu.cn

基于三维点云的红掌器官分割与表型分析

梅育成[1,2]，邹一波[1]，李佳毅[3]，徐瑜[4]，陈明[1*]，葛艳[1]

(1. 上海海洋大学信息学院，上海 201306；2. 上海建设管理职业技术学院，上海 201702；3. 上海现代建筑装饰环境设计研究院有限公司，上海 200120；4. 上海世博文化公园建设管理有限公司，上海 200126)

摘要：针对当前传统花卉类植物表型参数难以快速、准确、自动化获取的问题，笔者提出一种基于三维点云的红掌器官分割与表型分析方法。首先，基于运动恢复结构算法获取红掌三维点云模型，再进行背景去除及点云去噪等预处理操作；之后，提出基于颜色信息的红掌器官自动分割算法，自动提取单独的红掌器官点云；结合点云的RGB与曲率两大属性，提出红掌器官分类规则，实现红掌器官的自动分类；在此基础上，给出有效的红掌表型参数计算方法，完成株高、冠幅、苞片横径和佛焰苞个数4个关键性状的精确测量。结果表明，该方法实现了红掌关键表型自动分析，采用该方法获得的株高、冠幅、苞片横径和佛焰苞个数与人工测量结果的均方根误差分别为2.115、1.428、0.214 cm和0.272个，平均绝对百分比误差分别为4.445%、3.765%、2.295%、3.783%，总体低于其他方法的误差。由此可见，该方法可用于具有复杂结构和形态不规则的红掌花卉表型参数的提取。

关键词：红掌；三维重建；表型分析；点云分割；器官分类

中图分类号：TP391.41　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1007–1032(2025)03–0110–07

Segmentation and phenotypic analysis of anthurium organs based on three-dimensional point cloud

MEI Yucheng[1,2], ZOU Yibo[1], LI Jiayi[3], XU Yu[4], CHEN Ming[1*], GE Yan[1]

(1. School of Information, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Construction Management Vocational College, Shanghai 201702, China; 3. Shanghai Modern Architecture Decoration Environment Design and Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200120, China; 4. Shanghai World Expo Culture Park Construction Management Co. Ltd., Shanghai 200126, China)

Abstract: The automation and accuracy of collecting phenotypic parameters had been a difficulty in traditional flower plants. In this paper, we proposed a method for the segmentation and phenotypic analysis of anthurium organs based on three-dimensional point clouds. Firstly, the three-dimensional point cloud model of anthurium was obtained based on the structure from motion algorithm with application of the background removal and point cloud denoising. Then, an automatic segmentation algorithm for anthurium organs based on color information was proposed to automatically extract individual anthurium organs point cloud. Combining the two attributes of RGB and curvature of the point cloud, an anthurium organ classification rule was proposed to achieve automatic classification of anthurium organs. On this basis, an effective method for calculating the phenotypic parameters of anthurium was given to accurately measure four key traits, namely plant height, crown width, bract diameter and number of spathes. The results showed that this method could achieve automatic analysis of the key phenotypes of anthurium. The root mean square errors of the measurement results of plant height, crown width, bract diameter and number of spathes obtained by this method compared with the manual

收稿日期：2024–02–20　　**修回日期**：2024–03–22
基金项目：上海市科技创新行动计划(20dz1203800、21DZ1203005)
作者简介：梅育成(1999—)，男，安徽宣城人，硕士研究生，主要从事机器视觉、虚拟现实研究，996312210@qq.com；*通信作者，陈明，博士，教授，主要从事数据挖掘、物联网技术和农业信息技术研究，mchen@shou.edu.cn

measurement results were 2.115, 1.428, 0.214 cm and 0.272, respectively, and the average absolute percentage errors were 4.445%, 3.765%, 2.295% and 3.783%, respectively. The overall error was lower than that of other methods. It can be seen that this method could be used to extract phenotypic parameters of anthurium flowers with complex structures and irregular morphology in practice.

Keywords: anthurium; three-dimensional reconstruction; phenotypic analysis; point cloud segmentation; organ classification

红掌因其极高的观赏价值，备受消费者的青睐。近年来，中国学者对红掌的育种、分级、品种改良等进行了研究[1]。然而，大量表型性状数据缺失成为植物分子育种技术中基因差异研究的难题[2]。传统的植物表型测量方法一般采用手工测量，速度慢、主观性强，且还会对植物造成破坏。因此，建立一套准确无损、自动化、高效率的表型研究方法，对促进红掌分级评价和组培科学发展十分重要。

植物表型参数可分为内在生理参数与外在形态参数[3]。在植物外在形态参数获取方面，广泛应用的技术主要基于二维图像和三维点云这2种数据来源[4–6]，二维图像因维度限制对植物表型性状的测量不够准确，为此，研究人员采用三维点云方法提取植物外在形态参数。杨斯等[7]使用深度相机获取俯视黄瓜苗盘彩色三维点云，准确计算出株高。朱超等[8]使用FreeScanX3手持激光扫描仪获取玉米植株点云，利用骨架提取技术分割出果穗器官。苗艳龙等[9]通过地基激光雷达采集田间玉米点云数据，分割出单株玉米后测量玉米株高。然而，三维激光扫描设备的价格普遍高昂；激光雷达操作复杂且获取的点云数据量大；深度相机在采集数据过程中易受光照的影响。以上三维设备的缺点都限制了这些技术在高通量表型分析上的规模化应用。

通过对以上点云获取技术的分析可知，直接获取三维点云技术具有成本高、操作复杂、操作环境受限等缺点。而多视角立体视觉(MVS)[10]重建技术通过采集二维图像序列间接获取点云数据，操作方便、受环境影响小、成本低，已在植物表型分析上得到广泛应用。陈玲等[11]通过手持相机环绕绿萝一周连续采集图像得到多视角图像序列，并通过MVE系统得到绿萝的三维点云数据。陈辉等[12]使用智能手机相机旋转一周连续采集植株图像，并使用运动恢复结构(SFM)算法生成植株点云。张文麒等[13]利用相机、转台等搭建植株旋转式多视角采集装置，获取小麦多视角图像重建可视化点云。

为获取植物器官更详细的表型信息，需进行点云分割。肖奕同等[14]采用法线微分差异算法、改进的区域生长算法以及点云曲率特征实现大豆各器官的分割。彭程等[15]使用骨架提取技术结合区域生长的聚类算法分割出番茄叶片。赖亦斌等[16]使用区域增长算法、超体素聚类算法以及凹凸性的方法分别从烟草、玉米中分割出叶片器官。

以上三维点云分割方法主要针对玉米、大豆、番茄等器官较为单一且拓扑性强的植物进行器官分割，而使用骨架、欧式聚类等方法难以准确分割出结构复杂的红掌器官。本研究中，使用SFM算法获取红掌点云并进行预处理，提出一种红掌器官点云自动分割与分类算法，并建立株高、冠幅、苞片横径、佛焰苞个数等4个红掌关键表型性状的测量方法，以期实现便捷、准确、高效、自动化地红掌表型参数测量。

1　材料与方法

1.1　供试材料与数据获取

1.1.1　材料

红掌[17]叶片长而宽且颜色多变；花朵色彩鲜艳，花序结构非常复杂，花朵集成形成苞穗[18]，其中，佛焰苞形态和颜色的独特多样，也是衡量红掌优劣的重要指标[19]。本研究中，以3类盆栽红掌花卉为对象：第1类红掌的花叶重叠遮挡率低；第2类红掌的花叶重叠遮挡率适中；第3类红掌花叶重叠遮挡率高。

1.1.2　基于SFM的红掌点云获取

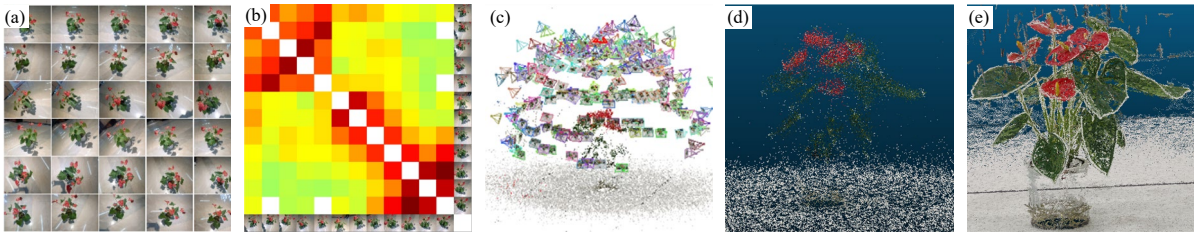
经预试验确定，以红掌为中心，选择距离红掌0.5 m范围内，使用相机连续采集红掌图像，分别采用俯视、平视和仰视3种角度每隔5° ~ 10°拍摄1幅图像，环绕红掌旋转拍摄1周，得到单株红掌的图像序列(图1(a))。获得多视角图像后，使用SFM算法[20]和聚类多视角立体(CMVS)算法[21]重建得到稠密红掌点云，其具体技术步骤如下。

1) 特征点匹配。使用尺度不变特征变换匹配(SIFT)算法[22]对图1(a)中的红掌图像序列两两进行匹配，对所有特征点进行穷举计算距离，得到如图1(b)所示的关系矩阵。从矩阵中可以得到红掌图像之间的相关程度。

2) 相机位置方向恢复。使用随机采样一致性(RANSAC)算法[23]求解出相机姿态，剔除错误的匹配对。在多幅红掌图像中识别和匹配特征，恢复相机位置和方向，如图1(c)所示。

3) 稀疏三维点云重建。当特征点匹配完成后，在得到相机估计参数的基础上，通过光束平差法(BA)[24]恢复出场景几何信息。经过BA算法优化后获得红掌的稀疏点云，如图1(d)所示。

4) 稠密三维点云建立。基于重建的稀疏点云，采用CMVS算法计算pixel–wise损失函数，以重建每个图像的视差图，然后将像素反向投影到所有重叠的图像，并进行三角测量，生成红掌稠密三维点云，如图1(e)所示。



(a) 红掌图像序列；(b) SIFT特征匹配关系矩阵；(c) 恢复的相机位置和方向；(d) 红掌稀疏点云；(e) 红掌稠密点云

图1 红掌三维点云重建过程中完成各步骤的结果

Fig.1 Results of each step in the process of 3D point cloud reconstruction of anthurium

1.2 红掌点云预处理

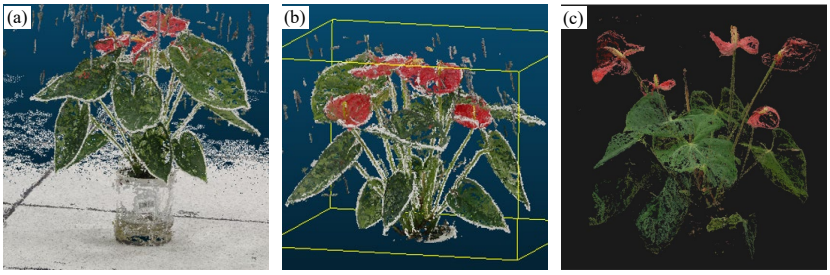
获取的红掌点云需进行预处理，主要包括背景去除和点云去噪两部分。同时，还需对点云模型进行坐标校正，以及获取点云模型与真实植物之间的比例。采用Python 3.9.9结合开源库Open3D编程对点云进行预处理。

1.2.1 背景去除

获取到的原始点云数据包括背景和红掌花卉两个部分(图2(a))。背景由大片的无关背景点云(如花盆、地面等)和散布在红掌器官周围的白点组成，其中，白点是由于红掌叶片、佛焰苞部分表面反光或叶片遮挡周围环境而产生的。针对不同类型的背景点采用不同的方法进行背景去除。

对于花盆、地面这类大片的无关背景点云，使用点云包围盒滤波器去除。从图2(b)可知，大片的无关背景点经过包围盒滤波器处理后得到了有效去除，但白点散布在红掌器官的周围，使用滤波器也容易造成红掌器官部分点云的去除，同时，白点和红掌点云在颜色属性上存在较大差异，因此，选取HSV颜色空间[25]作为特征，提取出红掌器官点云。通过HSV模型对红掌点云进行直方图统计，有效去除红掌器官点云周围的白点。

对图2(b)中红掌点云分别建立三维点的色调值(H)、饱和度值(S)、明度值(V)3种频率直方图。由于红掌器官具有多种颜色，需综合设定3个通道的阈值。根据所建立的HSV频率直方图取$H\in(0.15, 1.00)$、$S\in(0.20, 0.80)$、$V\in(0.05, 0.69)$，均能够达到较好的白点去除效果，如图2(c)所示。



(a) 原始点云；(b) 包围盒滤除后点云；(c) 白点去除后点云

图2 红掌背景去除前后的点云

Fig.2 Point cloud of anthurium before and after background removal

1.2.2　点云去噪

经过背景去除后，红掌点云中还存在一些噪点(图3(a))。噪点主要分为两类：红掌器官周围较近处的离群点；距离红掌较远处的孤立点或无效点。综合统计滤波方法和半径滤波方法对不同噪点进行去除，具体步骤如下。

1) 平均距离计算。首先遍历红掌点云，计算每个点与其最近的k个邻居点之间的平均距离(d_i)，再计算出所有d_i的均值(μ)和统计滤波的标准差(σ)。

2) 距离阈值计算。距离阈值(d_{max})可采用公式(1)进行计算，其中m是比例系数。

$$d_{max}=\mu+m\sigma \tag{1}$$

3) 剔除离群点。再次遍历红掌点云，若满足$d_i>d_{max}$，则记为离群点，并将其剔除。取k=517、σ=0.20，可达到高效去除红掌点云中稀疏离群点的目的，剔除离群点后的结果如图3(b)所示。

4) 半径滤波去噪。经统计滤波去噪无法去除红掌点云近处的少量孤立点或无效点(图3(b)红圈中的点)，需使用半径滤波进一步去噪。通过设定半径(r)，计算每个红掌点云在其半径范围内的其他点的个数。若半径范围内其他点个数少于某一设定的阈值点数(F)，则将该点滤除。取r=0.63、F=117，半径滤波去噪后的结果如图3(c)所示。

(a) 背景去除后的红掌点云；(b) 采用统计滤波器去噪后的红掌点云；(c) 采用半径滤波器去噪后的红掌点云

图3　去噪前后的红掌点云

Fig.3　Point cloud of anthurium before and after denoising

1.2.3　点云坐标校正

由于使用SFM算法重建得到的红掌点云模型的主方向与真实的红掌生长方向并不一致，需对红掌三维点云的坐标进行校正。使用主成分分析方法(PCA)对点云坐标进行校正，具体步骤如下。

1) 均值化归零。红掌点云可看成由P_1，P_2，P_3，…，P_N等N个点构成的点集合，任意一点P_i (x_i, y_i, z_i)都具有3个维度特征。先计算出位置平均数，再进行均值化归零操作，用于消除红掌点云平移的影响。

2) 特征值分解。计算均值归零化后的红掌点云数据的协方差矩阵并进行特征值分解，所得的特征向量即为红掌点云3个主成分的方向。

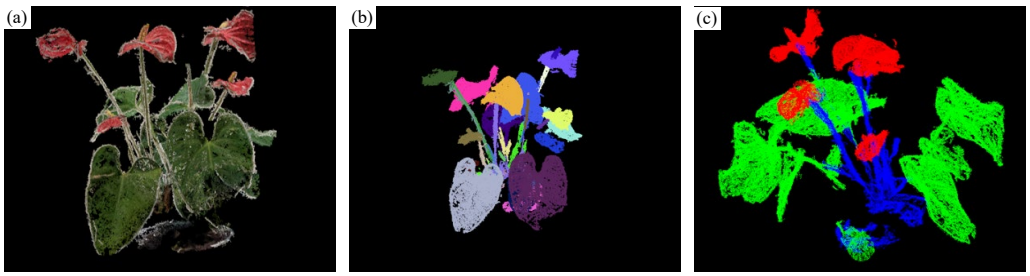
3) 主方向选择。将所得矩阵特征值进行排序，以最大特征值所对应的特征向量作为红掌点云主方向。对于红掌点云来说，最大特征向量是PCA的第一主成分。

4) 坐标变换。使用PCA计算得到的主方向构建一个坐标变换矩阵，这个矩阵的列是主方向的特征向量。将红掌点云数据与变换矩阵相乘，即可实现红掌点云坐标的校正。

1.3　红掌器官点云自动化分割与分类算法

1.3.1　基于颜色信息的区域增长分割

对红掌点云中的器官精确分割是红掌关键表型性状准确测量的前提。由于红掌点云(图4(a))器官颜色信息差距较大，使用点云的颜色信息代替法线



(a) 红掌点云；(b) 器官分割后的红掌点云；(c) 器官分类后的红掌点云

图4　红掌器官自动分割与分类的结果

Fig.4　Results of automatic segmentation and classification of anthurium organs

信息，实现红掌点云的区域增长分割，自动分离红掌器官点云。具体步骤如下。

1) 种子点选择。根据输入的红掌点云，选择1个或多个种子点作为初始区域，初始区域选择具有红掌特定颜色特征的点。

2) 相似性判断。遍历红掌点云中的每个点，计算每个点与其相邻点之间的颜色相似度。颜色相似度由RGB的欧式距离来定义，将颜色相似度以图的形式存储，每个点作为图的一个节点，相似的点之间以线段连接。

3) 近邻区域搜索。从种子点开始，依次遍历与之相邻的点，可得到其与种子点的颜色相似度。若相似度小于点云点之间的颜色相似度阈值(c_{CD})，则将该点添加到当前区域中，并将其标记为已访问。继续遍历相邻点。重复上述过程，直到当前区域中的点都被找到。

4) 合并区域。在区域增长后，为了解决过度分割问题，合并颜色相似度较高的相邻区域。相邻区域的颜色相似度阈值为r_{CD}。且在此步骤中，若当前聚类中点的数量小于设定的聚类点数量阈值1 000，则将该聚类与最近的聚类合并在一起。

通过合理设定c_{CD}和r_{CD}以达到最优的分割效果。图4(b)所示为在某一c_{CD}和r_{CD}下所得到的红掌叶片与佛焰苞的聚类。

为了验证方法的有效性，将本研究所建分割方法和常用的基于法线的区域增长分割方法[26]、欧式聚类分割方法[27]进行对比，并参照文献[15]，采用精确率、召回率和F_1分数作为分割算法精度的评价指标。

1.3.2 红掌器官分类

红掌点云经过器官分割后，需对聚类集合进行分类，结合RGB和曲率这两个重要的点云属性信息，设计红掌器官分类规则，实现红掌器官的自动化三分类任务。分类规则的两个核心步骤具体如下。

1) 佛焰苞与叶的分类。花期的盆栽红掌利用颜色属性差异可快速区分佛焰苞与叶片这两类器官。具体流程如下：①计算红掌聚类集合中每个聚类的RGB均值，集合中任意聚类都有RGB均值特征$M_i=(r_i, g_i, b_i)$，其中r_i、g_i、b_i分别为RGB三通道的值；②统计所有红掌器官聚类集合的均值RGB频率分布情况，根据均值RGB频率直方图结果，确定分类规则中R通道的阈值r_s和G通道的阈值g_s；③根据通道的阈值判断分类，对于任意聚类M，若$r_i\in[r_s, 255]$，则此聚类判定为佛焰苞，若$g_i\in[g, 255]$则判定为叶。

2) 叶与茎的分类。由于红掌的茎和叶器官的颜色较为接近，仅利用红掌点云的RGB信息会存在茎叶误分类的情况，需对步骤1)中分类为叶的聚类集合进行再分类。引入曲率[28]来实现茎叶之间的准确分类。具体流程如下：①对于每一个聚类，计算出聚类点云中每个点的法线向量，使用Kd–Tree搜索方法来查找点云中每个点的法线邻域；②设置搜索邻域大小为r_1，接着计算每个点的曲率，使用Kd–Tree搜索方法并设置邻域大小为r_2；③遍历聚类中的点云，求取所有点曲率的均值并将其作为该聚类的均值曲率，对于每个聚类都将得到1个均值曲率(C_i)；④统计步骤1)中得到的叶器官聚类集合中的C_i，设定茎、叶分类的平均曲率阈值为C_S，若$C_i<C_S$，则判定为叶器官，若$C_i\geqslant C_S$，则为茎器官。

图4(c)所示为对图4(b)中的红掌器官进行三分类后的结果，可见，分割后的红掌器官分为了佛焰苞、叶和茎3类。

1.4 红掌关键性状测量

在红掌器官自动化分割与分类的基础上，依据GB/T 18247.2—2000《主要花卉产品等级 第2部分：盆花》和NY/T 876—2004《红掌 切花》，建立自动测量红掌的株高、冠幅、苞片横径和佛焰苞个数等4个红掌关键性状的方法。

1.4.1 坐标比例获取

为精确计算红掌表型性状参数，以盆栽红掌的圆形花盆为基准，花盆上表面真实直径与重建得到的红掌模型中花盆上表面直径之比即为坐标比例。

1.4.2 红掌关键表型性状参数测量

1) 株高测量。红掌的株高为红掌最高点到花盆沿平面的距离。由于已得到校正后的点云的生长方向与z轴的正方向一致，遍历红掌点云中z轴上的点，找到z轴坐标值最大的点和最小的点，两者的差值乘坐标比例即为红掌的株高。

2) 冠幅测量。冠幅是植物冠部投影直径的平均值，使用轴对齐(AABB)型包围盒计算红掌的冠幅，将包围盒的长、宽较大者乘坐标比例即为红掌冠幅。

3) 苞片横径测量。苞片横径是指红掌佛焰苞苞

片横向的直径。通过生成红掌佛焰苞的有向包围盒(OBB)来测量红掌的苞片横径。红掌的苞片横径方向为第二、三主成分方向(即OBB长、宽的较大者)，取OBB长、宽的较大者乘坐标比例即为红掌的苞片横径。

4) 佛焰苞个数测定。完成红掌佛焰苞、茎和叶的三分类后，提取被判定为佛焰苞的聚类集合，该聚类集合的数量即为佛焰苞个数。

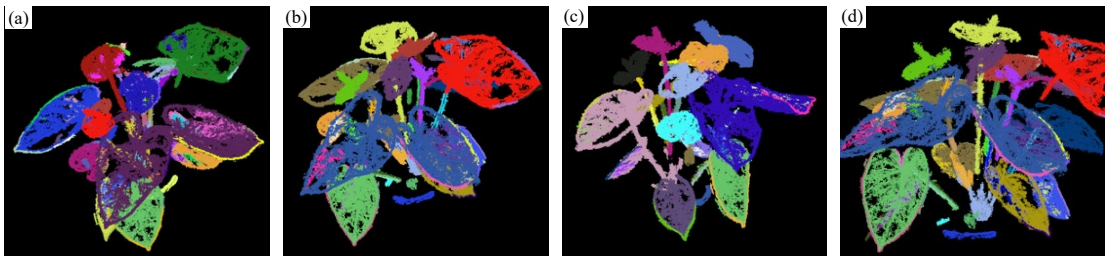
为了准确验证红掌关键表型计算方法的有效性和准确性，在Ubuntu 22.04环境下使用C++和PCL 1.13编程实现红掌器官点云的分割与分类试验以及关键性状的自动计算。以花叶重叠遮挡率不同的3种花期红掌为试验对象。将算法自动测量所得到的株高、冠幅、苞片横径和佛焰苞个数等4个红掌关键表型参数值与人工测量值进行线性回归和误差分析。使用均方根误差(RMSE)、平均绝对百分比误差(MAPE)和决定系数(R^2)评估算法的精度。

2　结果与分析

2.1　红掌点云器官点云分割结果

2.1.1　分割参数阈值

从图5(a)、图5(b)和图5(c)可以看出：当保持r_{CD}恒定不变，c_{CD}阈值过大，容易出现将距离较近重叠的叶片聚为同类的情况；而c_{CD}阈值过小，容易出现将单个器官分成两部分的过分割情况。通过对3种不同类别的红掌进行多次试验，得到红掌器官聚类分割的最佳参数为c_{CD}=11、r_{CD}=10，分割结果如图5(d)所示，可以看出，对于遮挡重叠度低和适中的红掌类别，采用该分割参数均能准确分割出各个单独器官，而对于遮挡重叠度较高的红掌器官紧贴部位，容易出现将同种器官(如2片叶片)聚类为1个簇的情况。这是由于算法难以分割距离很近且存在重叠的同类器官。



(a) c_{CD}=10；(b) c_{CD}=11；(c) c_{CD}=12；(d) c_{CD}=11、r_{CD}=10

图5　不同红掌器官聚类分割参数下的分割结果

Fig.5　Segmentation results of different clustering segmentation parameters of anthurium organs

2.1.2　分割方法的精度

从表1可知，本研究所建分割方法的精确率、召回率和F_1分数均明显高于另外两种常用方法的相应指标值。由于红掌的佛焰苞、叶等器官的颜色属性相比于其他点云属性更具区分度，使用基于颜色信息的区域增长分割算法更加适合红掌器官的分割。

表1　不同分割方法的红掌器官分割精度

Table 1　The segmentation accuracy of anthurium organs by different segmentation methods

方法	精确率	召回率	F_1分数
本研究所建分割方法	0.940	0.960	0.950
区域增长分割方法	0.775	0.831	0.802
欧式聚类分割方法	0.902	0.887	0.894

2.2　红掌关键表型性状测量结果

从表2可知，株高、冠幅、苞片横径和佛焰苞个数的算法测量值与人工测量值的线性回归方程的R^2分别为0.823、0.705、0.976、0.893，RMSE分别为2.115、1.428、0.214 cm和0.272个；MAPE分别为4.445%、3.765%、2.295%、3.783%。由此可见，本研究所建方法的RMSE和MAPE均处于较低值，可用于红掌等花卉表型性状参数的获取。

表2　红掌表型算法测量值与人工测量值对比结果

Table2　Comparison of the phenotypic algorithm and manual measurements of anthurium

红掌性状	线性回归方程	R^2	RMSE	MAPE/%
株高	y=0.919x+3.275	0.823	2.115 cm	4.445
冠幅	y=0.793x+7.084	0.705	1.428 cm	3.765
苞片横径	y=0.982x–0.147	0.976	0.214 cm	2.295
佛焰苞个数	y=0.833x+1.000	0.893	0.272 个	3.783

注：y为算法测量值；x为人工测量值。

3　结论与讨论

本研究中，通过结合点云RGB与曲率两大特

征，建立了基于三维点云的红掌器官点云分割方法，成功分割出红掌的各个器官点云，并能自动计算获取红掌的关键表型参数，红掌株高、冠幅、苞片横径和佛焰苞个数的算法测量结果的RMSE分别为2.115、1.428、0.214 cm和0.272个，MAPE分别为4.445%、3.765%、2.295%、3.783%，均处于较低值。

本研究中还存在一些不足，红掌点云的采集过程中连续拍摄角度和拍摄距离并不固定，对采集到的点云质量有一定程度的影响。红掌器官结构的复杂性使得在点云分割过程中易出现过分割和欠分割的问题。另外，红掌可能出现花、叶等器官枯黄的情况，这也会极大影响点云分割的准确性。点云分割的准确程度对后续表型测量有着很大的影响，未来可进一步优化点云分割的方法。

参考文献：

[1] 易双双，李崇晖，杨光穗，等. 红掌花色表型分类研究[J]. 北方园艺，2018(16)：105–111.

[2] 王瑞萍，刘东风，王先琳，等. 基于多视图几何的白菜薹分割与关键表型测量[J]. 农业工程学报，2022，38(16)：243–251.

[3] 孙国祥，汪小旵，刘景娜，等. 基于相位相关的温室番茄植株多模态三维重建方法[J]. 农业工程学报，2019，35(18)：134–142.

[4] DAS CHOUDHURY S，BASHYAM S，QIU Y M，et al. Holistic and component plant phenotyping using temporal image sequence[J]. Plant Methods，2018，14：35.

[5] PAULUS S. Measuring crops in 3D：using geometry for plant phenotyping[J]. Plant Methods，2019，15：103.

[6] 王传宇，郭新宇，杜建军，等. 基于时间序列图像的玉米植株干旱胁迫表型检测方法[J]. 农业工程学报，2016，32(21)：189–195.

[7] 杨斯，高万林，米家奇，等. 基于RGB–D相机的蔬菜苗群体株高测量方法[J]. 农业机械学报，2019，50(S1)：128–135.

[8] 朱超，苗腾，许童羽，等. 基于骨架的玉米植株三维点云果穗分割与表型参数提取[J]. 农业工程学报，2021，37(6)：295–301.

[9] 苗艳龙，彭程，高阳，等. 基于地基激光雷达的玉米株高与茎粗自动测量研究[J]. 农业机械学报，2021，52(S1)：43–50.

[10] GOESELE M，SNAVELY N，CURLESS B，et al. Multi-view stereo for community photo collections[C]//2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision. Rio de Janeiro，Brazil：IEEE，2007：1–8.

[11] 陈玲，王浩云，肖海鸿，等. 利用FL–DGCNN模型估测绿萝叶片外部表型参数[J]. 农业工程学报，2021，37(13)：172–179.

[12] 陈辉，王婷婷，代作晓，等. 基于运动恢复结构的无规则植物叶片面积三维测量方法[J]. 农业机械学报，2021，52(4)：230–238.

[13] 张文麒，吴升，郭新宇，等. 植株自旋转多视角重建技术在小麦植株三维表型获取中的应用评估[J]. 中国农业科技导报，2022，24(8)：87–98.

[14] 肖奕同，刘帅，侯晨连，等. 基于三维点云的大豆植株器官分割及表型分析[J]. 中国农业科技导报，2023，25(8)：115–125.

[15] 彭程，李帅，苗艳龙，等. 基于三维点云的番茄植株茎叶分割与表型特征提取[J]. 农业工程学报，2022，38(9)：187–194.

[16] 赖亦斌，陆声链，钱婷婷，等. 植物三维点云分割[J]. 应用科学学报，2021，39(4)：660–671.

[17] WEI H Y，TANG W Q，CHU X，et al. Grading method of potted *Anthurium* based on RGB-D features[J]. Mathematical Problems in Engineering，2021，2021：8555280.

[18] 马淑敏，范昕雨，田源，等. 休闲观光业态下红掌的发展探究[J]. 现代园艺，2022(4)：132–134，137.

[19] 李恺，杨艳丽，刘凯，等. 基于机器视觉的红掌检测分级方法[J]. 农业工程学报，2013，29(24)：196–203.

[20] WESTOBY M J，BRASINGTON J，GLASSER N F，et al. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry：a low-cost，effective tool for geoscience applications[J]. Geomorphology，2012，179：300–314.

[21] FURUKAWA Y，CURLESS B，SEITZ S M，et al. Towards Internet-scale multi-view stereo[C]//2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco，USA：IEEE，2010：1434–1441.

[22] WANG C X，LIU L G. Feature matching using quasi-conformal maps[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering，2017，18(5)：644–657.

[23] GOVINDU V M. Robustness in motion averaging[C]// Computer Vision：ACCV 2006. Berlin，Heidelberg：Springer，2006：457–466.

[24] TANG C Z，TAN P. BA-net：dense bundle adjustment network[EB/OL]. (2019–8–25). https://arxiv.org/abs/1806.04807v3.

[25] 黄芬，高帅，姚霞，等. 基于机器学习和多颜色空间的冬小麦叶片氮含量估算方法研究[J]. 南京农业大学学报，2020，43(2)：364–371.

[26] RABBANI T，HEUVEL F A，VOSSELMAN G. Segmentation of point clouds using smoothness constraint[J]. International Archives of Photogrammetry，Remote Sensing and Spatial Information Sciences，2006，36：248–253.

[27] LIU H Y，SONG R，ZHANG X B，et al. Point cloud segmentation based on Euclidean clustering and multi-plane extraction in rugged field[J]. Measurement Science and Technology，2021，32(9)：095106.

[28] MÉRIGOT Q，OVSJANIKOV M，GUIBAS L J. Voronoi-based curvature and feature estimation from point clouds[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics，2011，17(6)：743–756.

责任编辑：邹慧玲

英文编辑：柳 正