

增强的 OHTA 颜色空间融合 FPFH 识别点云中的甜椒果实^{*}

王青¹, 朱德利^{1,2}, 李炜¹

(1. 重庆师范大学 计算机与信息科学学院; 2. 重庆市数字农业服务工程技术研究中心, 重庆 401331)

摘要:【目的】研究三维点云中甜椒果实的精确识别,为采摘机器人进行采摘作业提供准备。【方法】提出一种增强 OHTA 颜色空间融合快速点特征直方图(Fast point feature histogram,FPFH)识别三维点云中甜椒果实的方法。以 OHTA 颜色空间为基础,通过分析甜椒植株颜色的特征,对 I_2 和 I_3 分量进行调整以增强果实与非果实的区分对比度;然后对所采集的点云进行几何特征的计算并利用 FPFH 对它进行描述;将颜色特征与 FPFH 进行融合得到点云描述符,并利用分类器进行判定分类,最终得到属于甜椒果实的点云。【结果】提出的方法可以将甜椒植株中的甜椒点云进行识别,且准确率较已有文献有一定提高。【结论】通过对比不同果实点云描述符的识别效果,提出的方法对甜椒果实点云的识别准确率为 97.31%,精确-召回曲线下的面积的值为 0.984,均优于其他点云描述符。

关键词:三维点云;果实识别;增强的 OHTA 颜色空间;FPFH

中图分类号:TP391

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2022)02-0111-09

通常对农作物果实的目标识别研究主要基于 RGB 彩色图像,通过提取分析农作物果实的颜色、形状和纹理等特征达到识别果实的目的^[1]。近些年来,基于深度学习的农作物果实识别则是通过对果实特征样本集的大量训练得到识别模型来进行果实识别^[2-5]。由于采摘机器人在进行采摘作业时,果实的空间位置是至关重要的信息,而 RGB 彩色图像缺少空间位置信息,无法为采摘机器人提供准确的空间定位,但三维点云中的空间位置信息则可以为采摘机器人提供果实与枝叶的相对位置信息,在很大程度上可以弥补二维图像的不足。

RGB-D 相机在农作物果实识别中的应用使得目标识别算法的研究不再局限于 RGB 彩色图像,而是扩展到了同时具有 RGB 和空间位置信息的三维点云。这样对目标果实特征的提取从传统的颜色、形状和纹理等特征扩展到表面法向、曲率等几何特征。随着三维点云数据获取与三维重建技术的发展,从点云获取作物果实对象的研究逐步增多并取得了一些有价值的成果。Wu 等人^[6]提出一种融合颜色和 3D 几何特征的水果点云分割方法,该方法首先对融合像素的颜色特征和法线方向进行初步分割,然后将处理过后的彩色图像与深度图像融合为点云并聚类为多个区域,再利用每个点云簇的视点特征直方图(Viewpoint feature histogram,VFH)去除非水果区域实现对水蜜桃果实的检测;Tao 等人^[7]提出了融合颜色和三维几何特征的三维描述子并利用 GA_SVM 分类器的分类实现对苹果果实的识别。随着深度学习方法在目标识别研究中的应用,有学者尝试使用深度神经网络来达到提高目标识别效果的目的。赵辉等人^[8]利用改进的 U-Net 网络对 Kinect V2 相机获取的彩色图像进行语义分割后与深度图融合获取苹果点云区域;Lin 等人^[9]利用基于 VGG16 的全卷积网络(Fully convolutional network,FCN)对 RGB-D 相机所采集的彩色图像进行分割,而后根据分割结果对所采集的深度图像进行聚类实现对番石榴的检测。

目前对三维点云中果实识别的研究主要集中在苹果、桃子等形状较为规则的水果上,而关于形状不太规则的甜椒等作物果实的研究较少,还具有很大的发展空间。基于此,本文提出一种基于增强的 OHTA 颜色空间和 FPFH 特征融合的甜椒果实点云的识别方法。实验结果表明,该方法具有较好的准确率,能够对甜椒果实进行准确识别。

^{*} 收稿日期:2021-05-07 修回日期:2021-11-03 网络出版时间:2021-11-17 10:13

资助项目:国家自然科学基金(No. 62003065);重庆市教育委员会科学技术研究项目(No. KJQN201800536);重庆市高校创新研究群体智慧农业的机器视觉感知与智能算法研究项目(No. CXQT20015)

第一作者简介:王青,女,研究方向为点云处理,E-mail:943477269@qq.com;通信作者:朱德利,男,副教授,博士,E-mail:delizhu@qq.com

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20211116.1759.004.html

1 实验方法

1.1 实验设备与数据采集

本文研究使用 Kinect V2 作为自主点云数据的采集设备。Kinect V2 是微软与 2014 年发布的搭载于 Xbox One 上的第二代 Kinect 相机,它包含一个彩色相机、一个深度相机和一个红外光发射器,可以同时获取场景的彩色图像、深度图像和红外图像信息。相较于其他 RGB-D 相机,Kinect V2 各方面的表现更为优秀。首先,该彩色相机的分辨率可以提供更高质量的彩色图像;其次,在深度数据方面,Kinect V2 的飞行时间深度测量技术相较于大部分深度相机的结构光深度测量技术数据获取速度更快,深度数据保真度更高,可以获得更多的物体细节。除此之外,Kinect V2 的水平视角为 70° ,垂直视角为 60° ,均优于其他 RGB-D 相机。目前已有许多研究对 Kinect V2 的精度进行了测试^[10],测试数据显示,在 0.5~3.0 m 范围内 Kinect V2 获取的深度图数据精度最高。

为丰富实验数据集,本文在使用自主采集的甜椒植株点云数据集(图 1 为自主采集数据的示意图)的同时也使用了 Sa 等人^[11]使用 RGB-D 相机所采集的甜椒植株点云数据集共同组成本次实验的数据集。

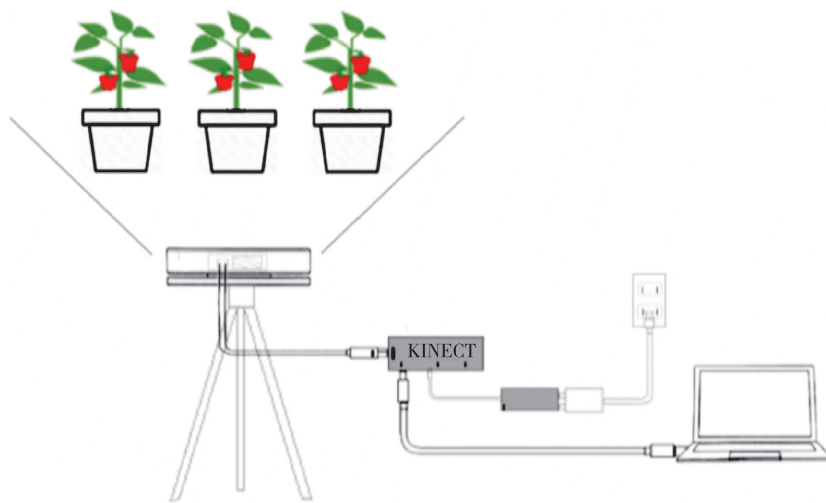


图 1 Kinect V2 采集数据示意图

Fig. 1 Data acquisition by Kinect V2

1.2 实验流程

甜椒植株点云中甜椒果实的识别实验流程如图 2 所示。首先对甜椒果实点云与非果实点云进行标注得到实验数据集;然后提取已标注点云的颜色特征;计算点云的几何特征并使用 FPFH 进行描述得到描述符;将颜色特征与 FPFH 描述符进行融合作为 XGBoost 的输入训练分类器并利用遗传算法优化关键参数,构建甜椒果实分类识别器。

1.3 增强 OHTA 颜色空间特征提取

甜椒果实与枝叶之间的颜色差异使得颜色特征可以作为识别二者的方法之一。RGB 是最常用来描述物体色彩的颜色空间,它是通过 R, G, B 这 3 个分量不同程度的叠加而产生广泛的颜色。但是由于这 3 个分量之间高度相关,其中某一分量的改变就可能会引起颜色发生改变。OHTA 颜色空间是 1980 年 Ohta 等人^[12]在经验总结的基础上,对 8 幅不同的彩色图像进行实验所归纳出的一组正交颜色特征集 $\{I_1, I_2, I_3\}$,该空间的应用在火焰检测^[13-14]以及彩色图像的颜色分割^[15]等方面已取得了较好的实验效果。OHTA 颜色空间是根据在模式识别的特征选择中,当一个特征具有较大方差时图像分割能力较强的理论,通过 Karhunen-Loeve 变换得到的具有较强分割能力的颜色特征。它与 RGB 空间转换关系为:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{4} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}.$$

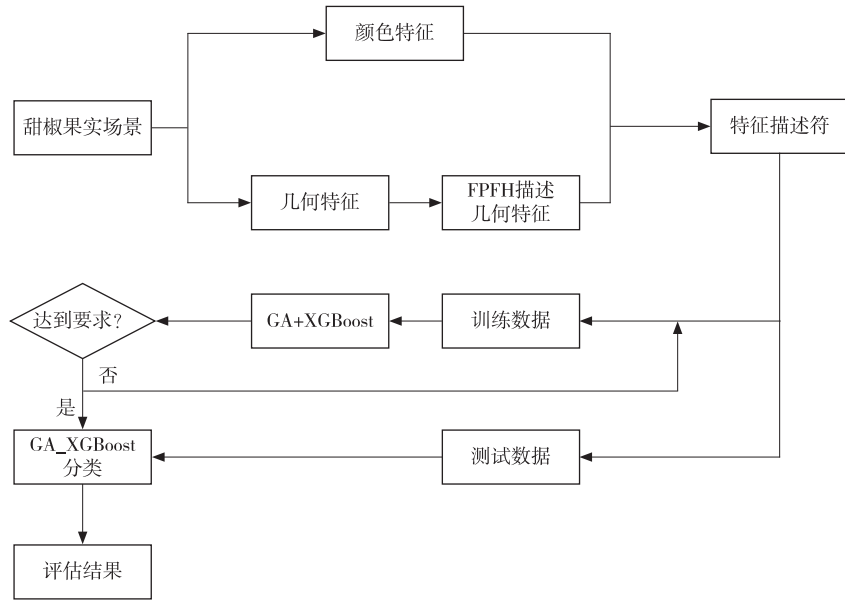


图 2 红色甜椒识别流程图

Fig. 2 Flowchart for red pepper recognition

图 3a 为自然光照条件下所采集到的 RGB 图像,图 3b~d 分别为 OHTA 颜色空间中的 I_1 , I_2 和 I_3 分量。在 OHTA 颜色空间中, I_1 分量表示强度,灰度图相较于另外两个分量对比度并不明显,但图像细节保留较好,而 I_2 与 I_3 这两个分量的灰度图均具有一定程度的对比度。

为进一步增强图 3 中甜椒果实与非果实的对比,本研究通过对甜椒颜色特征与 OHTA 颜色空间 3 个分量进行分析与实验,总结得出以下结论: I_1 分量作为描述强度的分量,对它进行增强并不会增加果实与非果实区域的对比度,反而会导致灰度图图像细节的丢失,因此不需要对 I_1 进行增强操作;图 3c 与图 3d 具有一定的对比度,但这两图的对比度较低,因此可以通过对 I_2 分量和 I_3 分量进行增强,以增加对比度较小的果实与非果实区域的差别,增强两个分量对颜色特征的描述。

对一幅大小为 $M \times N$ 的彩色图像 S 中的每一个像素点,生成一个由颜色信息描述的 3 维特征向量 $\mathbf{P}_k$:

$$\mathbf{P}_k = (R_k, G_k, B_k), k=1, 2, \dots, M \times N,$$

其中: R_k, G_k, B_k 分别为像素点 k 处的 R, G, B 的值。对于 S , 它的协方差矩阵为:

$$\mathbf{C}_S = \frac{1}{MN} \sum_{k=1}^{MN} (\mathbf{P}_k - \boldsymbol{\mu}_S)^T (\mathbf{P}_k - \boldsymbol{\mu}_S),$$

$$\text{其中: } \boldsymbol{\mu}_S = \frac{1}{MN} \sum_{k=1}^{MN} \mathbf{P}_k.$$

因协方差矩阵 $\mathbf{C}_S$ 为 3 阶实对称正定矩阵,故它的特征值为实数且特征向量两两正交。设该矩阵的特征值分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 且 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$, 对应的特征向量为 $\mathbf{W}_i = (w_{Ri}, w_{Gi}, w_{Bi}), i=1, 2, 3$ 。定义颜色特征 I_1, I_2, I_3 为:

$$I_i = w_{Ri}R + w_{Gi}G + w_{Bi}B, i=1, 2, 3.$$

由 Ohta 等人^[12]所做的实验中可知,对于每一幅场景,都近似有 $\mathbf{W}_1 = \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}\right), \mathbf{W}_2 = \left(\frac{1}{2}, 0, -\frac{1}{2}\right)$ 或 $\mathbf{W}_2 = \left(-\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}\right), \mathbf{W}_3 = \left(-\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, -\frac{1}{4}\right)$ 。对颜色特征 I_2 与 I_3 进行增强操作,即对协方差矩阵 $\mathbf{C}_S$ 的特征值 λ_2 与 λ_3 所对应的特征向量 $\mathbf{W}_2$ 与 $\mathbf{W}_3$ 进行调整,使通过调整后的 $I_i (i=2, 3)$ 具有更强的颜色特征描述,如下式所示:

$$I_i = 4 w_{Ri}R + w_{Gi}G + 4 w_{Bi}B, i=2, 3.$$

经过调整后协方差矩阵的特征向量 $\mathbf{W}_i (i=1, 2, 3)$ 的正交性保持不变,颜色特征 I_1, I_2, I_3 相互独立。称经过调整的 OHTA 颜色空间为增强的 OHTA 颜色空间 (Enhanced-OHTA, OHTA^E), 它的表示形式下式所示:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2^E \\ I_3^E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 2 & 0 & -2 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}.$$

由图 4 可以看出:OHTA^E颜色空间的 I_2^E 分量和 I_3^E 分量的灰度图相较于图 3 而言,甜椒果实与非果实区域的对比度更为明显。

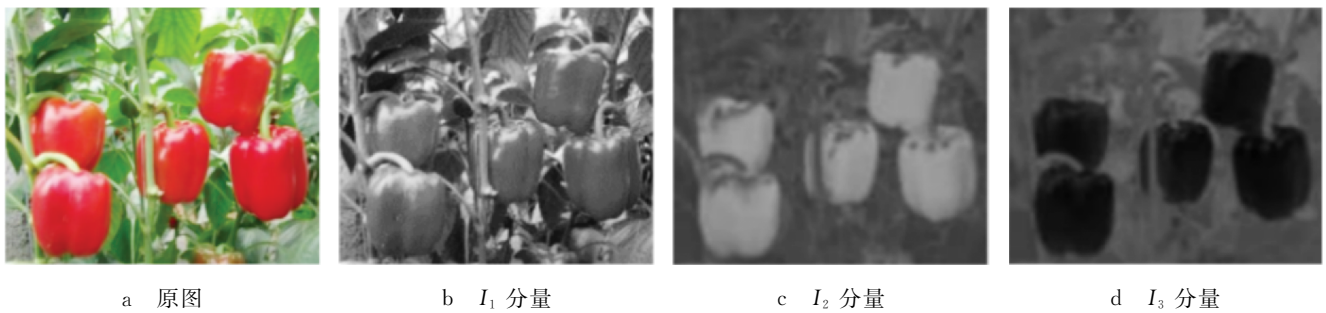


图 3 OHTA 颜色空间分量灰度图

Fig. 3 The gray scale image of OHTA color space components

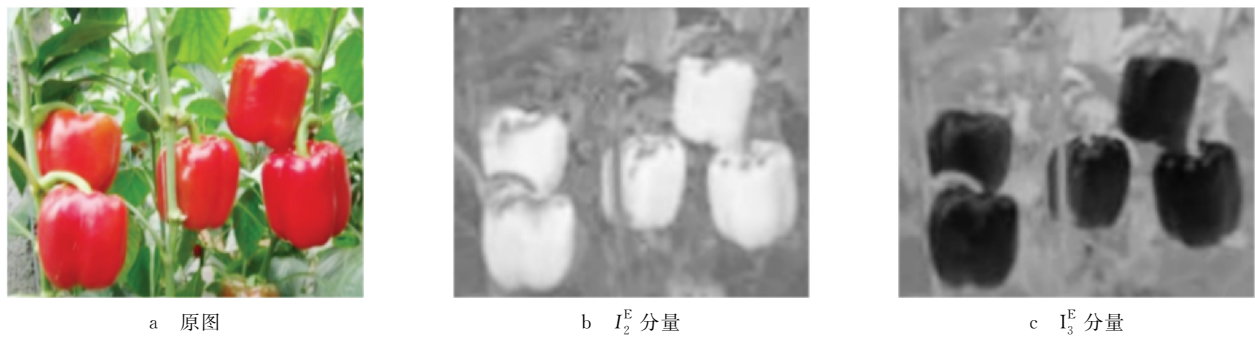


图 4 I_2^E 分量和 I_3^E 分量灰度图

Fig. 4 The grayscale image of I_2^E and I_3^E components

图 5 所示为OHTA^E颜色空间下,甜椒植株点云中果实与非果实区域 3 个分量的灰度特征直方图的对比。由图 5 可知,对于两个不同的类别,它们的直方图分布明显不同。

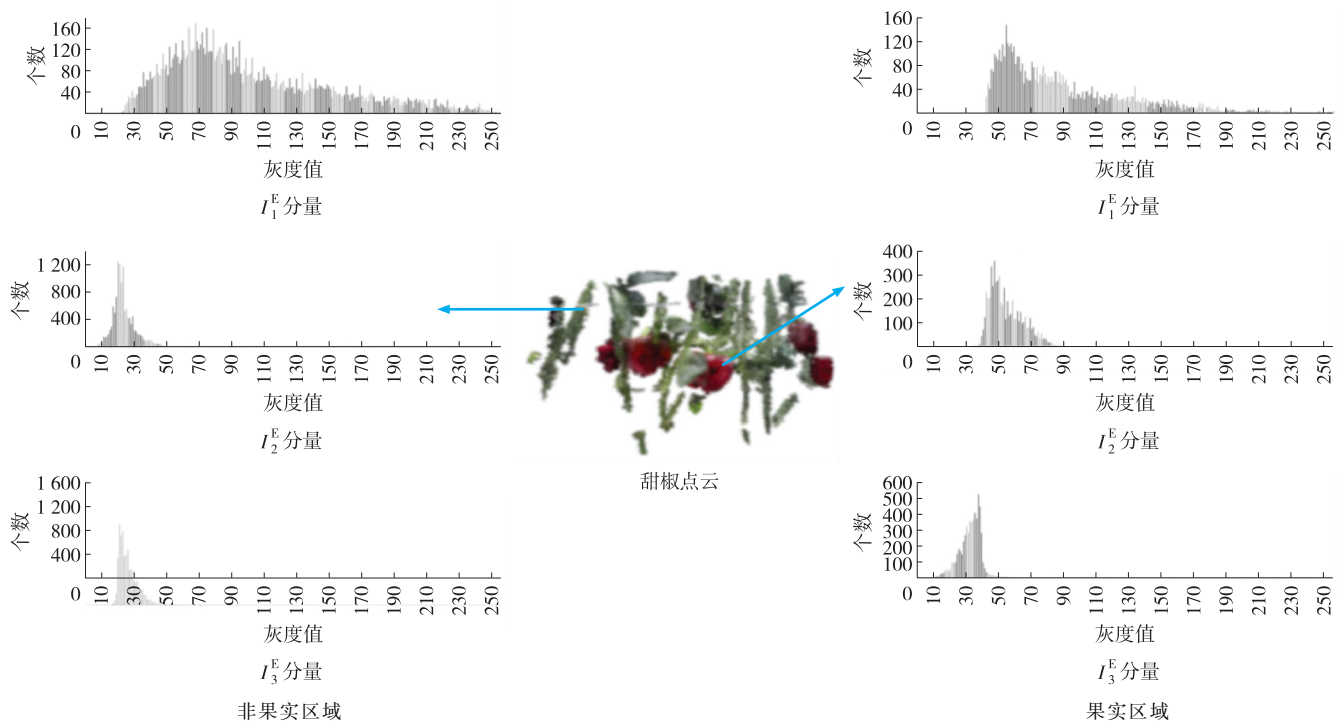


图 5 不同区域的 3 个分量的灰度特征直方图

Fig. 5 The gray feature histogram of three components color features in different region

1.4 快速点特征直方图描述红椒几何特征提取

点云之间的几何关系如表面法向、曲率估计等可以用来对不同的三维几何进行区分,它们比较容易计算,但其中所包含的信息是有限的。使用点特征直方图(Point feature histograms, PFH)来对它们进行描述则可以很好地弥补这一缺陷。PFH是将目标点的局部几何关系以统计直方图的形式进行描述,它以点 P 为圆心, r 为半径构造的球形区域,寻找点 P 的 K 邻域点,通过统计目标点与 K 邻域内对应的法向相对关系,形成PFH。图6显示了PFH计算的影响区域。

假设对于某一点 p_1 和 p_2 ,法向分别为 $\mathbf{n}_1$ 和 $\mathbf{n}_2$,以 p_1 点的法向为 U 轴建立局部坐标系,如图7所示。

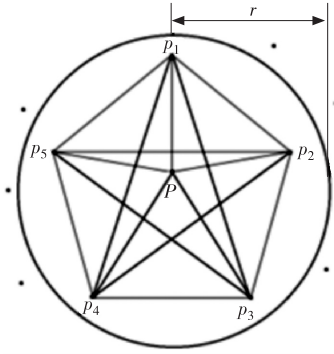


图6 PFH计算时的影响半径

Fig. 6 The influence radius of calculated PFH

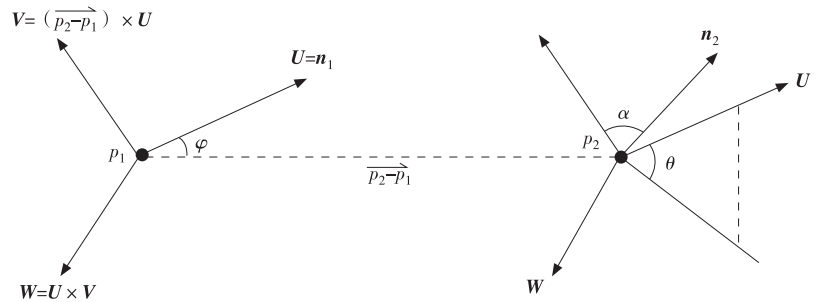


图7 局部坐标系

Fig. 7 Local coordinates

将 p_1 的 UVW 局部坐标系平移至 p_2 ,则图6中 φ 为 $\mathbf{n}_1$ 与点对 p_1 和 p_2 连线的夹角, α 为 p_2 的法向与 V 轴的夹角, θ 为法线 $\mathbf{n}_2$ 在 UW 平面投影与 U 轴的夹角,则计算公式为:

$$\alpha = \mathbf{V} \cdot \mathbf{n}_2,$$

$$\varphi = \mathbf{U} \cdot \frac{\overrightarrow{p_2 - p_1}}{d},$$

$$\theta = \arctan(\mathbf{W} \cdot \mathbf{n}_2, \mathbf{U} \cdot \mathbf{n}_2),$$

$$d = \|\overrightarrow{p_2 - p_1}\|_2.$$

通过计算 P 与 K 近邻点的所有点对的 $(\alpha, \varphi, \theta)$ 的值并将每个值使用5个区间进行统计,最终生成 $5^3 = 125$ 维的PFH特征向量。但是,PFH计算的复杂度高,耗费时间长,Rusu等人^[16]提出的FPPH便是对PFH缺点的改进,在对PFH特性进行保留的同时降低了计算复杂度并提升了运算速度。FPPH特征计算影响区域如图8所示。FPPH与PFH的不同点在于FPPH只计算目标点 p_i 与近邻点的PFH,该过程称为SPFH。分别对目标点 p_i 的邻域点的SPFH进行计算,而后进行加权计算,最终得到FPPH。相应的加权计算公式为:

$$V_{\text{FPPH}}(p_i) = V_{\text{SPFH}}(p_i) + \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \frac{1}{\omega_j} V_{\text{SPFH}}(p_j).$$

其中: ω_j 为点 p_i 与它的近邻点 p_j 的欧氏距离。

图9为甜椒植株点云场景的表面法线及果实与非果实两个区域的快速点特征直方图可视化。图9中间彩图为该场景下甜椒植株表面法向可视化图,随机选取该场景中果实与非果实区域中各两点作为目标点,利用FPPH对所选点周围的样本表面变化进行捕获以描述几何特征。图9中分别展示了果实区域和非果实区域的快速点特征直方图。从图9中可以看出,对于不同区域,点特征直方图的分布具有较为明显的差异。

将上文所提取的颜色特征描述符与FPPH描述符进行融合得到OHTA^E_FPPH特征描述符作为GA_XGBoost^[17-18]分类器的输入。

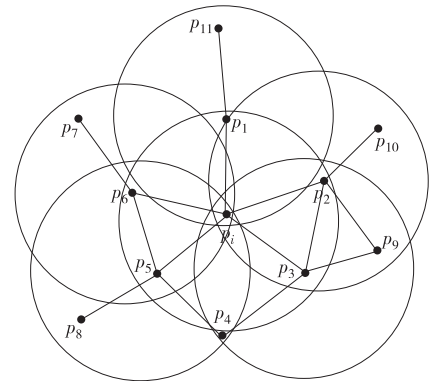


图8 FPPH计算时的影响半径

Fig. 8 The influence radius of calculated FPPH

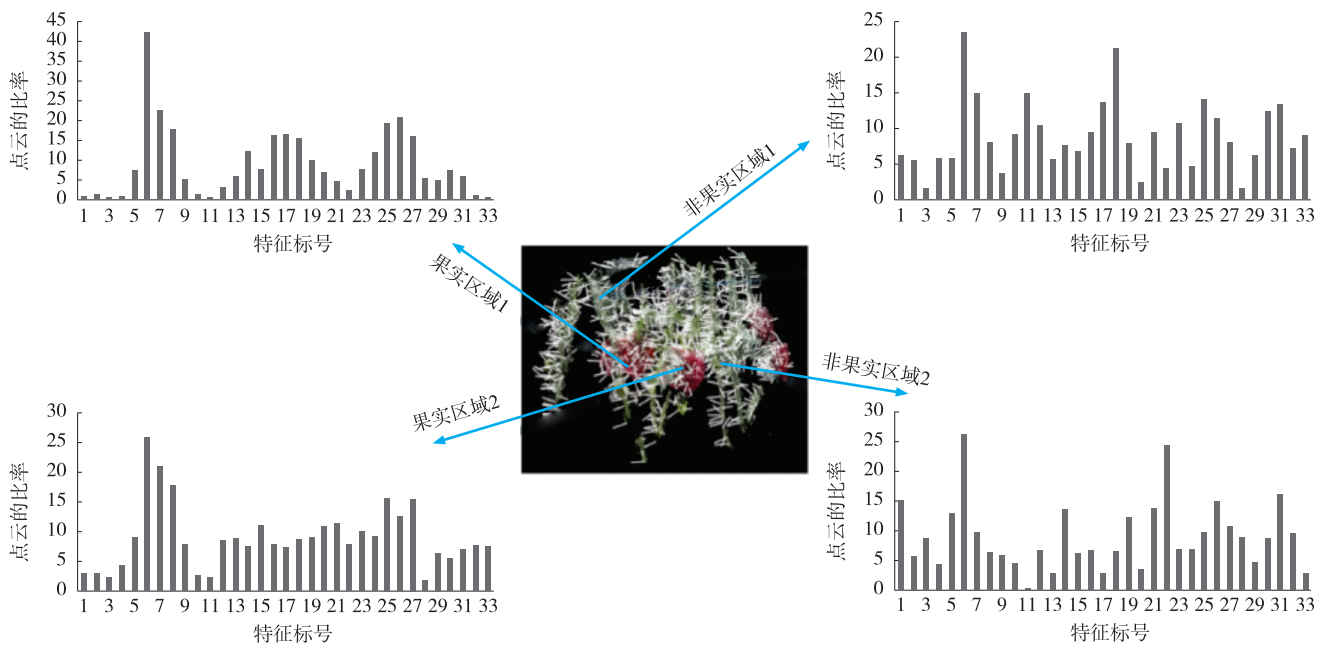


图 9 点云场景的表面法向以及不同区域的直方图

Fig. 9 Surface normal and histograms in different region of point cloud scene

2 实验结果与分析

本文甜椒果实检测方法采用 C++ 语言和一些点云库函数在 VS2017 环境下编写;GA_XGBoost 分类器对点云特征进行分类,使用 Python 3.7 编写。本实验运行于 Core(TM)i5-5200U CPU,4 GB 内存,Windows 10 操作系统的计算机上。本次试验所使用的数据集由 Sa 等人^[11]提供的经典的甜椒数据集中随机选取的一部分与使用 Kinect V2 自主采集的甜椒数据集两部分组成。图 10a 为甜椒点云模型,图 10b,c 为利用数据集中已标注好的甜椒果实数据和自己所标注的非甜椒果实数据。通过提取甜椒果实与非甜椒果实单个点云的 OHTA^E_FPFH 特征描述符输入分类器进行判定分类,分类器的输出为每个点云的二值预测(甜椒果实点云为 1,非果实点云为 0)。



图 10 点云数据示例图

Fig. 10 Point cloud dataset example

使用 GA_XGBoost 分类算法,把上述方法得到的数据作为特征向量输入到算法中,训练得到甜椒果实点云分类器。为验证本文方法的有效性,从多个甜椒点云场景中选出 5 种具有代表性的甜椒场景,分别为场景一:光线暗;场景二:正常光线;场景三:光线较暗;场景四:果实粘连;场景五:果叶粘连。使用甜椒果实点云分类器进行甜椒果实的识别,分类结果如图 11 第 1 列所示。由图 11 可看出,本文方法可将 5 种不同场景的甜椒果实进行识别且在最大程度上保证了识别的完整性,但其中仍有少量分类错误的枝叶点云的存在。

为对本文所使用的点云描述符能力进行评价,选用 FPFH 与文献[11]两种描述符与本文进行对比。由图 11 可见,在 3 种点云描述符中 FPFH 的分类结果比另外两种要差,它可以将甜椒果实进行识别,但对于非果实区域的大量点云存在分类错误;本文方法与文献[11]均可将甜椒场景中的甜椒果实进行识别,对于场景一、场景二、

场景三,文献[11]所存在的分类错误点远多于本文所用方法,而在场景四与场景五中,本文所用方法的噪声点略高于文献[11]。仅是用肉眼对分类结果进行观察评价难以断定 3 种方法的优劣。因此,为了对 3 种描述符进行更为客观地评价对比,本文通过使用精准率、召回率、F1-值以及准确率这 4 个指标对 3 种方法分别进行评价。精准率即在所有预测为正的点云数据中,预测正确的点云数据所占的比例;召回率即实际为正的样本数据中,预测正确的点云所占的比例;F1-值是一个平均数,是对精准率与召回率进行平均的结果;准确率即所有预测正确的点云数据占全部点云数据的比例。指标的结果对比如表 1 所示。

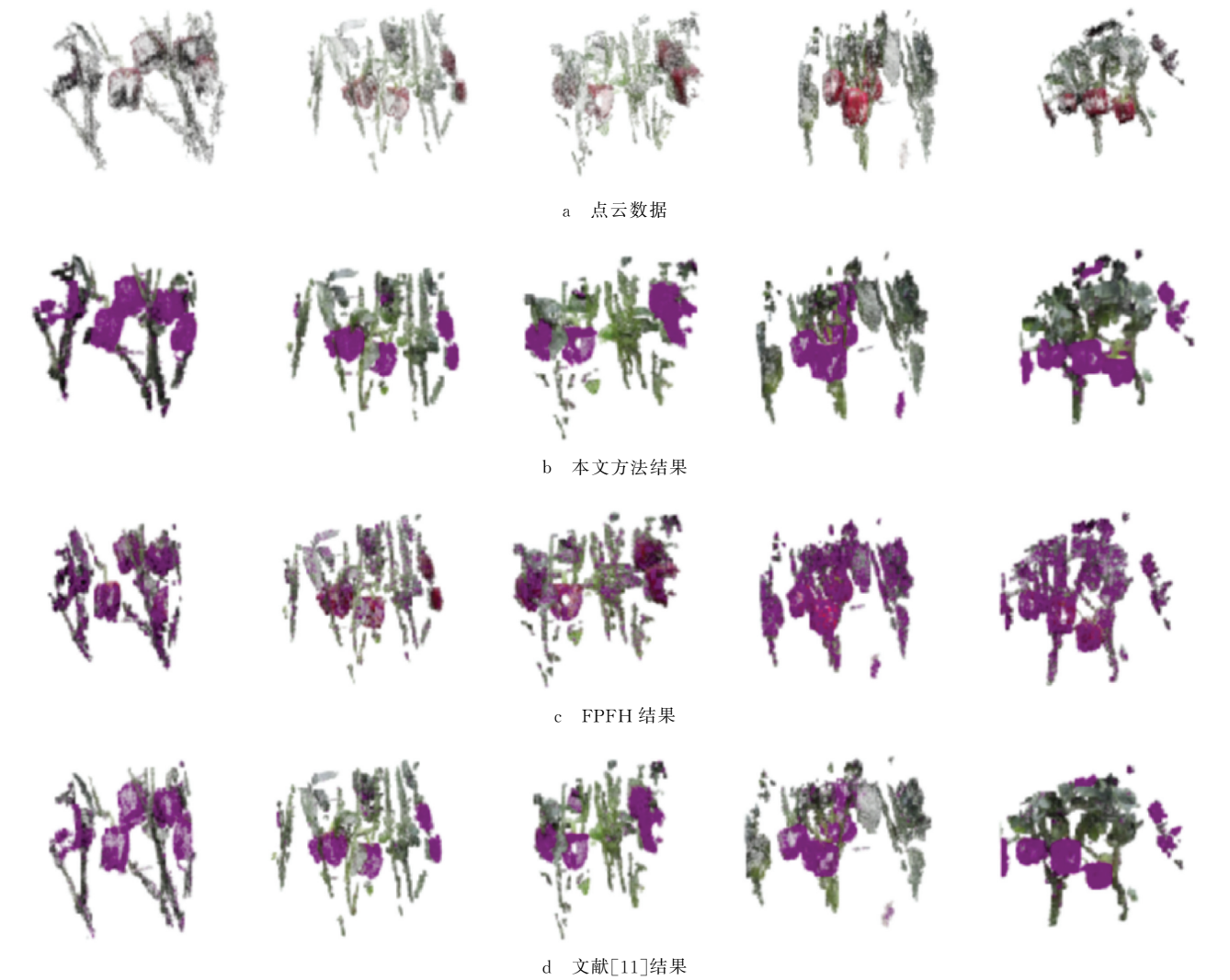


图 11 3 种描述符识别结果

Fig.11 The result recognition of three descriptor

表 1 3 种不同描述符的精确率、召回率、F1-值以及准确率

指标	本文描述符	FPFH	文献[11]描述符
精确率	0.90	0.39	0.95
召回率	0.98	0.85	0.93
F1-值	0.94	0.54	0.94
准确率	0.973 1	0.697 5	0.970 2

由表 1 可见,相较于 FPFH,本文方法的精确率、召回率、F1-值以及准确率的值均高于 FPFH,这证明了颜色特征与 FPFH 进行融合描述点云的特征是具有一定可行性的。与文献[11]的点云描述符相比,本文所使用的 OHTA^E_FPFH 描述符在准确率上略优。但仅使用准确率对特征描述符进行评价结果可能会存在偏差,因此本

文同时使用精准-召回曲线对特征描述符进行评价(图 12)。从图 12 中可以看出 FPFH 描述符的精准-召回曲线被本文描述符以及文献[11]描述符完全包围,因此可以判断后两者的性能优于 FPFH 描述符;而本文描述符以及文献[11]描述符精准-召回曲线两者相交,此时通过计算曲线下面积(Area under curve, AUC)来进行评价。由图可见,本文方法 AUC 值为 0.984,略高于文献[11]的 0.981,因此可以证明,本文所用方法略优于 FPFH 描述符与文献[11]所用描述符。

近些年来,深度学习逐渐应用于三维点云的识别研究。对于目前深度学习方法识别三维点云中的果实,主要在于使用 RGB-D 相机所采集的彩色图像进行语义分割等操作,来得到目标区域并与深度图进行融合完成果实识别的目的。但深度学习方法在前期进行网络训练时对数据集的需求量大且需要做众多的预处理,训练出的模型复杂且对计算机性能有一定的要求。本文所用方法前期对数据集的数量要求小于深度学习,且由于是直接对三维点云进行处理来获取特征进行点云分类训练,所训练得到的点云分类模型小于深度学习且对计算机的性能要求低于深度学习方法,且识别精度满足为甜椒果实检测提供信息指导。

3 结论

为实现采摘机器人对甜椒果实的准确识别,本文以甜椒植株点云作为处理对象,将单个点云进行标注划分为果实与非果实点云。通过分析,提出一种利用 OHTA^E 颜色空间对点云进行颜色描述,融合 FPFH 对点云几何信息进行描述为特征的 OHTA^E_FPFH 描述符,对甜椒植株中的果实点云与非果实点云进行描述,以此作为 XGBoost 的输入训练分类器并利用遗传算法优化关键参数,构建 GA_XGBoost 甜椒果实分类识别器,对甜椒植株点云进行分类,得到其中的果实点云,进而达到检测其中甜椒果实的目的。结果表明:本文方法具有较高的识别精度和较好的分类性能,满足采摘机器人对甜椒植株中果实检测的提供信息指导的要求。在下一步研究中,将对所采集的点云进行预处理,以减少噪声点与离群点的影响;对分类器进行进一步的优化,来提高计算速度,确保对果蔬采摘机器人指导的实时性;同时在本文研究的基础上对果实空间定位进行研究,为采摘机器人进行采摘作业奠定基础。

参考文献:

- [1] 李振雨,王好臣. 基于视觉识别定位的苹果采摘系统研究[J]. 图学学报,2018,39(3):493-500.
LI Z Y, WANG H C. Research on apple picking system based on visual recognition and location[J]. Journal of Graphics, 2018, 39(3):493-500.
- [2] 蔡健荣,周小军,李玉良,等. 基于机器视觉自然场景下成熟柑橘识别[J]. 农业工程学报,2008(1):175-178.
CAI J R, ZHOU X J, LI Y L, et al. Recognition of mature citrus in natural scene based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008(1):175-178.
- [3] 吕强,蔡健荣,赵杰文,等. 自然场景下树上柑橘实时识别技术[J]. 农业机械学报,2010,41(2):185-188.
LÜ Q, CAI J R, ZHAO J W, et al. Real-time identification of citrus in natural scene[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2):185-188.
- [4] 熊俊涛,刘振,汤林越,等. 自然环境下绿色柑橘视觉检测技术研究[J]. 农业机械学报,2018,49(4):45-52.
XIONG J T, LIU Z, TANG L Y, et al. Research on visual detection technology of green citrus in natural environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):45-52.
- [5] SA I, GE Z Y, DAYOUB F, et al. Deepfruits: a fruit detection system using deep neural networks[J]. Sensors, 2016, 16(8): 1222.
- [6] WU G, LI B, ZHU Q, et al. Using color and 3D geometry features to segment fruit point cloud and improve fruit recognition accuracy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 174:105475.

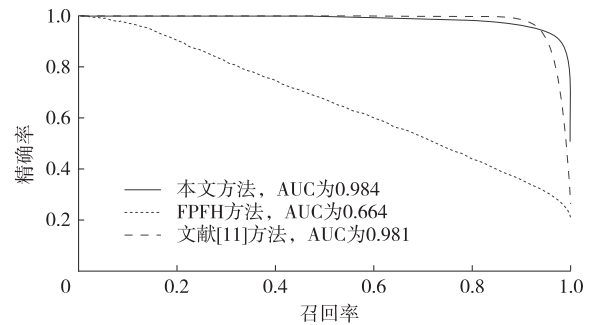


图 12 3 种不同描述符的精准-召回曲线

Fig. 12 Precision-Recall curve of three different descriptor

- [7] TAOY T,ZHOU J. Automatic apple recognition based on the fusion of color and 3D feature for robotic fruit picking[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2017,142:388-396.
- [8] 赵辉,李浩,岳有军,等. 基于 RGB-D 相机的矮砧苹果识别与定位[J]. 计算机工程与设计,2020,41(8):2278-2283.
ZHAO H, LI H, YUE Y J, et al. Recognition and localization of short anvil apple based on RGB-D camera[J]. Computer Engineering and Design,2020,41(8):2278-2283.
- [9] LIN G C,TANG Y C,ZOU X J, et al. Guava detection and pose estimation using a low-cost RGB-D sensor in the field[J]. Sensors,2019,19(2):428.
- [10] YANG L,ZHANG L,DONG H, et al. Evaluating and improving the depth accuracy of kinect for Windows v2[J]. IEEE Sensors Journal,2015,15(8):4275-4285.
- [11] SA I,LEHNERT C,ENGLISH A, et al. Peduncle detection of sweet pepper for autonomous crop harvesting-combined colour and 3D information[J]. IEEE Robotics & Automation Letters,2017,2(2):765-772.
- [12] OHTA Y I,KANADE T,SAKAI T, et al. Color information for region segmentation[J]. Computer Graphics and Image Processing,1980,13(3):224-241.
- [13] 刘佳丽,叶炯耀. 基于 Ohta 颜色空间的多信息融合火焰检测[J]. 华东理工大学学报(自然科学版),2019,45(6):962-969.
LIU J L, YE J Y. Flame detection based on multi-information fusion based on OHTA color space[J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition),2019,45(6):962-969.
- [14] 吴建胜,高云玲,张宾. 一种基于视频的火焰检测方法[J]. 计算机应用与软件,2014,31(1):173-175.
WU J S,GAO Y L,ZHANG B. A flame detection method based on video[J]. Computer Applications and Software,2014,31(1):173-175.
- [15] 郭峰,曹其新,谢国俊,等. 基于 OHTA 颜色空间的瓜果轮廓提取方法[J]. 农业机械学报,2005(11):119-122.
GUO F,CAO Q X,XIE G J, et al. Extraction of melon and fruit contour based on OHTA color space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2005(11):119-122.
- [16] RUSU R B,BLODOW N,BEETZ M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration[C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation. Kobe;IEEE,2009:3212-3217.
- [17] CHEN T Q, GUESTIN C. XGBoost:a scalable tree boosting system[C]//Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York;ACM,2016:785-794.
- [18] 何龙. 深入理解 XGBoost[M]. 北京:机械工业出版社,2020.
HE L. Deep understanding of XGBoost[M]. Beijing:Machinery Industry Press,2020.

Recognition of Sweet Pepper Point Cloud Based on Fusion of Enhanced OHTA Color Space and FPFH

WANG Qing¹, ZHU Deli^{1,2}, LI Wei¹

(1. Department of computer and information science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331;

2. Research Center of Chongqing Digital Agricultural Service Engineering Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: [Purposes] By studying the accurate recognition of pepper fruit in order to provide preparation for picking operation of harvesting robots. [Methods] A method with the fusion of enhanced OHTA color space and FPFH (Fast Point Feature Histogram) to recognize sweet pepper fruit in 3D point cloud was proposed. In order to enhance the contrast between fruit and non-fruit, adjust to the I_2 and I_3 components by analyzing color features based on the OHTA color space. Then compute 3D geometry and described by FPFH. Finally, the 3D descriptor of single point cloud with the fusion of color features descriptor and FPFH descriptor was extracted as input to classifier to get fruit point cloud. [Findings] The method can identify the pepper point cloud in the pepper fruit tree, and the accuracy is improved. [Conclusions] Compared with different fruit point descriptor, the recognition accuracy of the proposed method was 97.31%, and the the precision-recall Under Curve Area (AUC) was 0.984, which are both superior other descriptor.

Keywords: 3D point cloud; fruit recognition; enhanced OHTA color space; FPFH

(责任编辑 许 甲)