

雷旺雄, 卢 军. 葡萄采摘机器人采摘点的视觉定位[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(4): 1015-1021.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.04.029

## 葡萄采摘机器人采摘点的视觉定位

雷旺雄, 卢 军

(陕西科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 针对葡萄采摘机器人在自然环境下采摘点定位困难的问题, 本研究提出了一种基于分水岭果梗图像分割和最小角度约束的采摘点定位方法。第一, 将采集的葡萄果实图像变换到 YUV 颜色模型, 对 U 通道灰度图进行均衡化处理, 然后进行双阈值分割和形态学开操作去掉干扰区域, 再对二值图像进行填充; 第二, 以检测到的葡萄果实位置为参考, 确定葡萄串果梗感兴趣区域, 对该感兴趣区域进行分水岭操作; 第三, 对果梗二值图像进行角点检测, 然后分别对每个果梗检测到的角点数据进行线性回归, 将拟合到的直线分别与垂直于地面直线进行角度计算, 将夹角角度最小的拟合直线所在的果梗确定为葡萄串所连的果梗; 第四, 对该果梗检测到的角点数据进行  $K$  均值聚类分析, 聚类中心为最佳采摘点。对采集于晴天顺光、晴天逆光和晴天遮阳这 3 种条件下各 40 幅夏黑葡萄图像进行验证, 采摘点定位成功率为 89.2%, 单张葡萄图像的采摘点平均定位时间为 0.65 s。说明该方法可以为葡萄采摘机器人提供准确的采摘点坐标信息。

**关键词:** 葡萄; 采摘机器人; 视觉定位; 图像分割; 分水岭; 角点检测;  $K$  均值聚类

**中图分类号:** S663.1; TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)04-1015-07

## Visual positioning method for picking point of grape picking robot

LEI Wang-xiong, LU Jun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to solve the difficulty of grape picking robot location in the natural environment, a method of picking point positioning was proposed based on watershed image segmentation and minimum angle constraint. Firstly, the collected grape images were transformed into the YUV color model, and histogram equalization was carried out for U channel grayscale image. Furthermore, double threshold segmentation and morphological operations were performed to remove the interference areas, and the binary image was filled. Secondly, using the detected location of grape fruit as reference, the region of interest (ROI) of grape stem was determined, and watershed operation was carried out. Thirdly, corner detection was performed on the binary image of grape fruit stem. Moreover, linear regression was performed on the corner points of each fruit stem, and the angles between the fitting straight lines and the line perpendicular to the ground were calculated, respectively. If the angle was the smallest, the fruit stalk was determined as the fruit stalk connected to the grape string. Finally,  $K$ -means clustering algorithm was performed on the corner points of the fruit stem, and the center of mass after clustering was used as the best picking point. In addition, 40 images were collected for verification under three conditions: sunny day with direct sunlight, sunny day with backlighting and sunny day with shade. The results showed that the accuracy reached 89.2% under these three conditions, and the positioning time of single grape image was

0.65 s. In conclusion, the grape picking robot can obtain the exact coordinate of picking point by this method.

**Key words:** grape; picking robot; visual positioning; image segmentation; watershed; corner detection;  $K$ -means clustering

收稿日期: 2020-02-25

基金项目: 陕西省科技厅工业攻关基金项目 (2016GY-049)

作者简介: 雷旺雄 (1996-), 男, 山西晋中人, 硕士研究生, 主要从事机器视觉研究。 (E-mail) 1980412627@qq.com

通讯作者: 卢 军, (E-mail) lujun@sust.edu.cn

视觉识别定位系统是农业采摘机器人中不可或缺的一部分,影响着机器人采摘的准确率和效率。由于农业采摘机器人面对的采摘环境恶劣,并且背景干扰较大,所以视觉识别定位算法的鲁棒性和实时性就变得至关重要。

近年来,科研人员对葡萄采摘机器人的视觉识别定位进行了大量探索。葡萄果实的分割检测是葡萄采摘机器人采摘点定位的首要任务。Luo 等<sup>[1]</sup>通过提取葡萄有效颜色分量,并结合 AdaBoost 分类器来检测成熟的葡萄。罗陆锋等<sup>[2]</sup>使用改进的人工蜂群算法对夏黑葡萄进行分割。宋西平等<sup>[3]</sup>使用快速模糊  $C$  均值聚类 (FFCM) 算法对采集图像的色调分量进行分割,完成对夏黑葡萄的检测。田锐等<sup>[4]</sup>对 RGB 颜色模型的颜色样本值进行计算,并根据样本值对紫色和红色葡萄进行分割,准确率达到 90%。马本学等<sup>[5]</sup>使用大津法或双阈值法对 3 种不同光照条件下的葡萄进行分割,再基于轮廓做外接矩形,然后结合角点检测的方法获得葡萄果实的位置信息。在葡萄采摘机器人的定位研究中,果实重叠是影响定位准确率的重要因素。罗陆锋等<sup>[6]</sup>通过图像分割和轮廓分析,再结合几何约束模型,对双串葡萄进行识别和提取。葡萄果粒直径的大小反映了葡萄的水分缺失情况,曾庆兵等<sup>[7]</sup>和陈英等<sup>[8]</sup>分别基于轮廓分析和数字形态学方法对堆叠葡萄果粒进行尺寸检测。有学者采用泽尔尼克 (Zernike) 矩边缘检测算法对葡萄果实轮廓进行提取,实现了葡萄果实几何特征的实时检测<sup>[9]</sup>。在葡萄生长过程中,套袋是很重要的措施,可以预防病虫害,并避免农药与葡萄果实的直接接触。为了获得葡萄果实的位置信息,杨庆华等<sup>[10]</sup>提出结合葡萄颜色和形状特征来获取葡萄果实位置信息的方法。张凯等<sup>[11]</sup>基于遗传算法对葡萄果实的套袋目标特征进行快速提取与识别。在葡萄的采摘过程中会对葡萄果实造成外在损伤,为解决这一问题,罗陆锋等<sup>[12]</sup>通过双目立体视觉技术对葡萄包围体进行求解和定位,实现葡萄采摘机器人的防损采摘。针对葡萄串采摘点的定位问题,张同勋等<sup>[13]</sup>利用逆向识别算法结合模板匹配和测距仪来实现葡萄串采摘点的定位。熊俊涛等<sup>[14]</sup>针对非结构环境中扰动葡萄的定位问题,通过对葡萄串进行形态分析并计算单摆运动的周期和摆角进行视觉定位,再使用霍夫直线拟合,结合角度计算方法获取采摘点的位置信息。为了对重叠葡萄果

实进行采摘,Luo 等<sup>[15]</sup>使用轮廓分析方法对重叠的葡萄果实进行分离,再采用几何约束法获取感兴趣区域采摘点的位置信息。罗陆锋等<sup>[16]</sup>使用葡萄图像分割结合点线最小距离约束方法,实现葡萄采摘机器人采摘点的精确定位。

综上所述,目前对葡萄采摘机器人的视觉检测研究主要集中在葡萄果实的分割,葡萄果实尺寸信息的获取以及葡萄采摘点的定位。现有的葡萄果实采摘点定位研究中,在复杂的葡萄种植环境下使用霍夫直线检测容易将叶脉以及其他枝干检测为直线,影响采摘的准确性。因此,本研究拟基于果梗、树叶和背景灰度级的不同,提出一种基于分水岭果梗图像分割和最小角度约束的采摘点定位方法,然后分别在晴天顺光、晴天遮阳和晴天逆光 3 种条件下进行验证,以期提高葡萄采摘点视觉定位的准确率和实时性,为实现葡萄自动化采摘提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 图像采集

本研究所用葡萄图像采集于陕西省鄠邑区户太 8 号葡萄园,使用相机为佳能 EOS M200,其分辨率为  $2\,340$  像素  $\times$   $1\,080$  像素,由于葡萄采摘机器人通常在白天进行采摘,故采集了在晴天顺光、晴天逆光和晴天遮阳这 3 种情况下的夏黑葡萄图像各 40 张,并用高斯滤波法去除图像采集中产生的噪声,使采集的图像变得较为平滑。

### 1.2 采摘点视觉定位总体实现方案

图 1 显示,本研究提出的葡萄采摘点定位方法主要由 3 部分组成。第一,葡萄果实识别,主要是识别葡萄串并获取其位置信息;第二,果梗图像分割,根据获取到的葡萄串信息定位果梗区域,对该区域进行分水岭分割;第三,采摘点确定,基于果梗二值化检测到的角点数据,通过线性回归和最小角度确定目标果梗,最后  $K$  均值聚类算法获得的聚类中心就是采摘点。

### 1.3 葡萄串分割

采摘点的准确定位是基于目标果实串的位置信息进行的,因此分别对不同情况下的夏黑葡萄图像进行分割,将夏黑葡萄图像转换到 YUV 颜色模型中,Y 表示亮度通道,U、V 是 2 个代表色度的通道,U 通道受光照影响最小。在 YUV 通道下对葡萄串图像进行拆分,得到 U 分量图(图 2a)。在 U 分量

直方图中,灰度值主要分布在 $[50, 180]$ (图2b),葡萄图像的对比度比较低,然后对拆分后的U分量图进行直方图均衡化处理,使葡萄果实在U通道下的

灰度值尽可能分布在 $[0, 255]$ ,从而增强图像的对比度。葡萄串的灰度级分布函数如公式1:

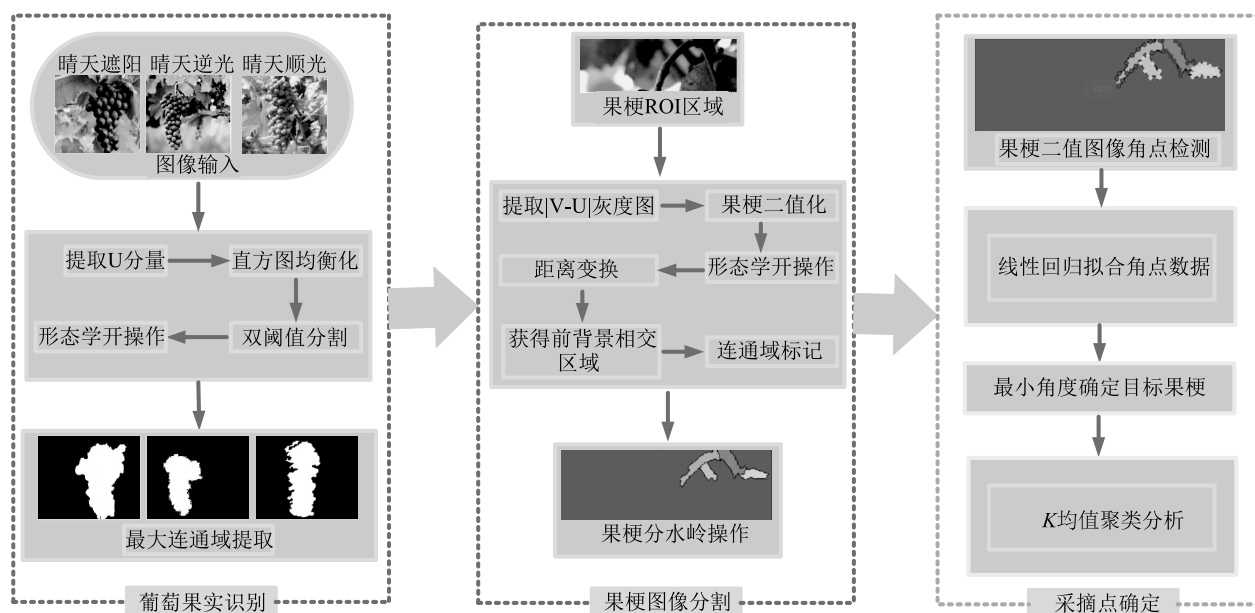
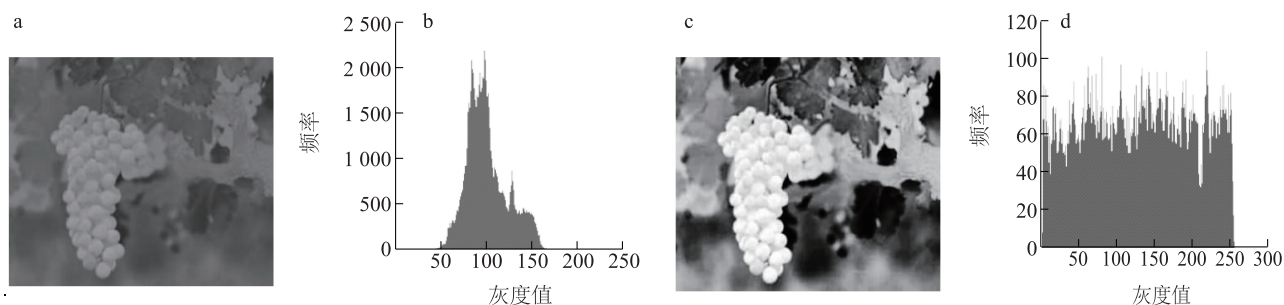


图1 采摘点定位流程图

Fig.1 Flowchart of picking point positioning



a:U分量图;b:U分量直方图;c:均衡化U分量图;d:均衡化U分量直方图。

图2 葡萄串图像U分量均衡化处理

Fig.2 U component equalization of grape clusters

$$p(r_k) = \frac{n_k}{N} \quad (k=0, 1, 2, \dots, L-1) \quad (1)$$

直方图线性变换:

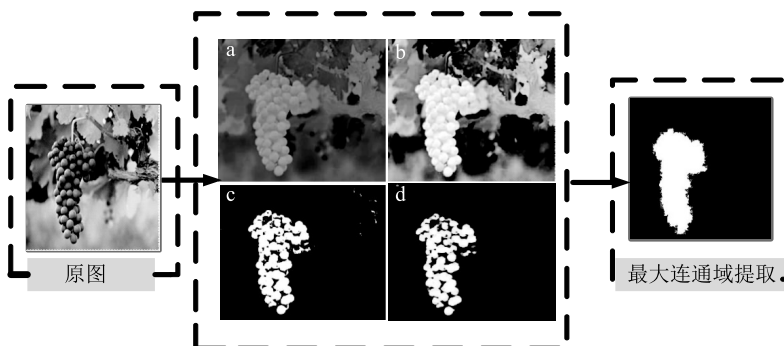
$$s_k = (L-1) \sum_{j=0}^k p(r_j) = (L-1) \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{N} \quad (k=0, 1, 2, \dots, L-1) \quad (2)$$

式中, $N$ 表示图像的像素总数, $n_k$ 表示灰度级为 $r_k$ 的像素个数, $r_k$ 表示第 $k$ 个灰度级, $p(r_k)$ 表示灰度级 $r_k$ 出现的概率, $s_k$ 表示输出图像的灰度级, $L$ 是图像中灰度级数量。

将输入图像中灰度级为 $r_k$ 的各像素根据公式(2)进行映射,可得到均衡化U分量图(图2c),从中可以看出目标区域与背景的对比度更加明显,便于后期的阈值分割。均衡化U分量直方图(图2d)显示,经过均衡化处理之后,葡萄串的灰度值映射在 $[0, 255]$ ,图像灰度的动态范围得到了增加,对比度得到了提高。因此,更容易找到葡萄串阈值分割的下限( $thresh1$ )和上限( $thresh2$ ),并且 $thresh1 < thresh2$ 。采用双阈值分割分别对晴天顺光、晴天逆光和晴天遮阳这3种情况下的U分量图进行操作,双阈值化操作可

表示为公式(3)。利用形态学开操作去除干扰的噪声区域,再对二值图像进行填充,提取最大连通域,夏黑葡萄串分割具体操作如图 3 显示。

$$g(x,y)=\begin{cases} 1 & \text{其他} \\ 0 & \text{thresh1} \leq f(x,y) \leq \text{thresh2} \end{cases} \quad (3)$$



a:提取 U 分量;b:直方图均衡化;c:双阈值分割;d:形态学开操作。

图 3 葡萄串图像分割过程

Fig.3 Image segmentation process of grape clusters

#### 1.4 葡萄串果梗感兴趣 (ROI) 区域的确定

葡萄串果梗 ROI 区域的获取可以减小果梗检测的噪声干扰。葡萄串果梗在葡萄串的正上方,因此葡萄串的位置可以作为葡萄串果梗感兴趣区域定位的先验信息。首先,对葡萄串做最小外接矩形,对葡萄串轮廓进行测量;其次,按照公式(4)计算,得出葡萄串区域和果梗区域;最后,针对果梗 ROI 区域进行采摘点检测。

$$\begin{cases} ROI\_x = a, & x + \frac{1}{6}w \leq a \leq x + \frac{5}{6}w \\ ROI\_y = b, & y \leq b \leq y + \frac{2}{9}h \end{cases} \quad (4)$$

式中, $ROI\_x$  表示感兴趣区域的横坐标, $ROI\_y$  表示感兴趣区域的纵坐标, $w$  和  $h$  分别表示矩形框的长和宽, $(x,y)$  和  $(x+w,y+h)$  分别为矩形框的左上角和右下角坐标。

#### 1.5 果梗图像分水岭分割

为了提高葡萄串果梗分割的泛化性,对晴天顺光、晴天逆光和晴天遮阳这 3 种情况下的果梗进行不同颜色空间通道以及 I-V-U 灰度图的对比分析,果梗、树叶和背景呈现出不同的灰度级别,I-V-U 直方图(图 4)、果梗原图(图 5a)、I-V-U 灰度图(图 5b)显示,果梗区域的灰度值为[20,70],树叶的灰度值为[208,255],背景的灰度值为[119,151]。

式中, $g(x,y)$  表示二值图像灰度值, $f(x,y)$  表示原图灰度值, $\text{thresh1}$  表示阈值下限, $\text{thresh2}$  表示阈值上限。

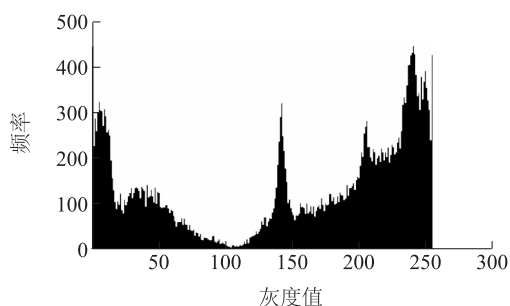


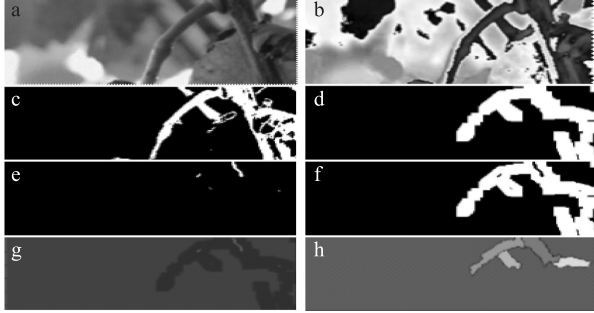
图 4 I-V-U 直方图

Fig.4 I-V-U histogram

葡萄串果梗与细的树枝粘连交错,图像分割困难,使用距离变换的分水岭分割能够较好分割出葡萄串果梗。图 5 显示,果梗 ROI 区域分割,首先根据 I-V-U 直方图对果梗区域进行双阈值分割,对分割后的二值图像进行形态学开操作,消除噪点,然后对二值图像进行距离变换。数字图像中对距离的定义有很多,本研究采用欧氏距离,通过计算每个像素点之间的距离获得灰度值,实现二值图像的距离变换,对距离变换后的灰度图做阈值分割,得到前景,也就是果梗和细小的树枝区域。其次将距离变换之前的二值图像与距离变换之后的二值图像进行相减,便得到前景与背景交界区域,定义为边界区域或者未知区域,然后进行连通域标记,用 0 来表示未知区域,背景区域及前景区域转变为其他整数,例如+1。最后



进行分水岭操作,将灰度图像视为拓扑表面,图像中的像素值 $f(x,y)$ 相当于地形海拔高度,局部极小值的区域为汇水盆地,随着注水量的增加,水位线不断上升,不同汇水盆地的山脊阻止水的汇聚,就会形成分水岭。



a: 果梗原图; b:  $|V-U|$  灰度图; c: 果梗二值化; d: 形态学开操作; e: 距离变换; f: 前景与背景交界区域; g: 连通域标记; h: 分水岭操作。

图5 果梗 ROI 区域分割过程

Fig.5 Region of interest (ROI) segmentation process of fruit stalk

### 1.6 葡萄串果梗的确定

分水岭操作可以将葡萄串果梗很好地分割出来,然后对分割的每个果梗进行颜色阈值分割,并对每个果梗的二值图像做 Harris 角点检测。Harris 角点检测是滑动窗口  $W$  向任意方向移动,然后比较窗口滑动前与滑动后灰度值的变化情况,如果灰度值变化程度大,那么该窗口就存在角点,灰度变化值  $E_{x,y}$  定义为:

$$E_{x,y} = \sum w_{u,v} [I_{x+u,y+v} - I_{u,v}]^2 \quad (5)$$

式中,  $E_{x,y}$  表示灰度变化值,  $w_{u,v}$  表示窗口函数,  $I_{x+u,y+v}$  表示平移后的灰度值,  $I_{u,v}$  表示平移前的灰度值,  $x,y$  表示窗口平移量。

为每个果梗二值图像检测到的角点寻找拟合直线,要使角点数据离拟合直线尽可能近一点。定义损失函数如公式(6),用梯度下降法对其进行优化,寻找最优的权重参数和偏置值(图6)。

$$Loss = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - (wx_i + b)]^2 \quad (6)$$

式中,  $Loss$  表示损失值,  $N$  表示样本总数,  $x_i, y_i$  分别表示第  $i$  个角点数据实际的  $x$  轴和  $y$  轴坐标值,  $w$  表示权重参数,  $b$  表示偏置值。

由于受葡萄果实重力的影响,葡萄串果梗基本是垂直向下的,计算每个果梗与垂直于地面直线的

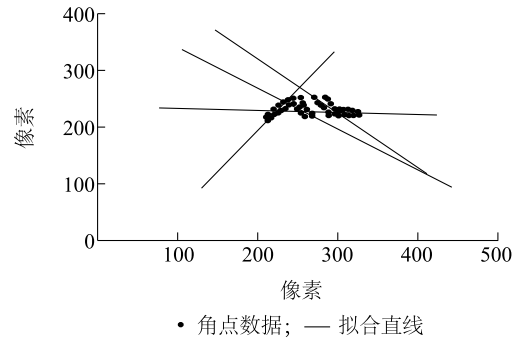


图6 拟合直线

Fig.6 Fitting straight line

夹角,夹角角度最小的拟合直线所在的果梗就是葡萄串果梗,即目标果梗(图7)。

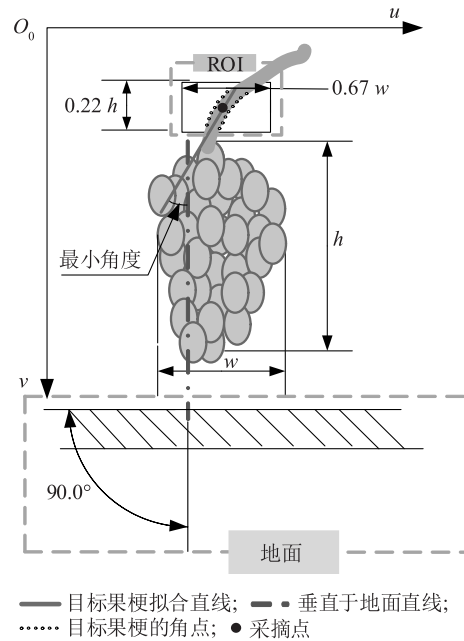


图7 葡萄采摘点的计算模型

Fig.7 Calculation model of grape picking point

对目标果梗检测到的角点数据进行  $K$  均值聚类分析,首先初始化  $C$  个聚类中心  $Z(i)$ , 本研究中  $C=1$ ,在接下来的  $k$  次迭代过程中,会按照以下步骤来计算每个样本与聚类中心的距离,以任一样本点  $X$  及样本个数  $i=1,2,3,\dots,m$  为例,如公式(7)。

$$j = \arg \min \| X - Z_i(k) \| \quad (7)$$

$j$  表示样本  $X$  与  $C$  个聚类中心距离最近的类别,  $Z_i(k)$  表示聚类中心,  $X$  表示任一样本点。

$$Z_i(k+1) = \frac{1}{n_i} \sum_{X \in S_j(k)} X \quad (8)$$

根据公式 8 计算新的聚类中心,则  $X \in S_j(k)$ , 式中,  $X$  表示任一样本点,  $S_j(k)$  是  $Z_i(k)$  聚类中心的样本集合,  $n_i$  为  $S_j(k)$  中的样本数,  $i$  表示样本个数,  $Z_i(k+1)$  表示  $i$  个样本经过  $k+1$  次迭代之后的聚类中心。

在得到聚类中心之后,通过计算使得误差平方、误差平方和均最小。如果  $Z_i(k+1) = Z_i(k)$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), 则说明算法收敛, 算法结束, 否则  $k = k+1$ , 从公式(7)循环, 最终得到的聚类中心即为采摘坐标点, 算法迭代了 3 次, 最终目标果梗角点数据聚类结果如图 8 显示。

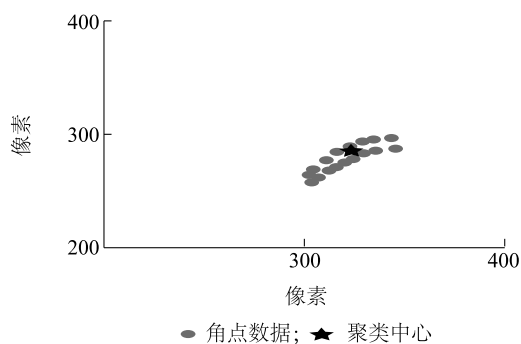


图 8 目标果梗角点  $K$  均值聚类

Fig.8 K-means clustering of the corner points of target fruit stem

$$E = \sum_{X \in S_j(k)} \|X - Z_i(k+1)\|^2 (i = 1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

式中,  $X$  表示任一样本点,  $Z_i(k)$  表示  $i$  个样本经过  $k$  次迭代之后的聚类中心,  $S_j(k)$  是  $Z_i(k)$  聚类中心的样本集合,  $E$  表示误差平方和。

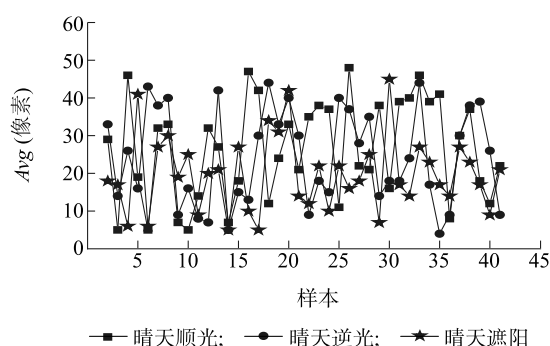
## 2 结果与分析

在本次试验中, 分别对晴天顺光、晴天逆光和晴天遮阳这 3 种情况下的夏黑葡萄图像进行果梗采摘点检测, 将采集后的图片分辨率压缩为 600 像素 × 700 像素, 每张图片中目标果梗面积为 1 200 ~ 1 700 像素。通过公式(10)对本研究方法得到的目标果梗聚类中心坐标点  $A(u, v)$  和目标果梗轮廓坐标点  $B(x_i, y_i)$  进行平均距离计算。图 9 显示, 在晴天顺光条件下, 目标果梗聚类中心坐标点与目标果梗轮廓坐标点之间的距离 ( $Avg$ ) 为 5 ~ 48 像素, 平均值为 26 像素; 在晴天逆光条件下,  $Avg$  为 4 ~ 44 像素, 平均值为 24 像素; 在晴天遮阳条件下,  $Avg$  为 5 ~ 45 像素, 平均值为 20 像素。经分析, 本研究算法在晴天

遮阳条件下的图像分割效果最佳, 采摘点定位成功率较高。

$$Avg = \frac{1}{n} \sqrt{(x_i - u)^2 + (y_i - v)^2} \quad (10)$$

式中,  $Avg$  表示目标果梗聚类中心坐标点与目标果梗轮廓坐标点之间距离的平均值;  $n$  表示目标果梗轮廓坐标点的总个数;  $u, v$  表示目标果梗聚类中心坐标点;  $x_i, y_i$  表示目标果梗轮廓坐标点。



$Avg$ : 目标果梗聚类中心坐标点与目标果梗轮廓坐标点之间距离的平均值。

图 9 采摘点与目标果梗轮廓的距离平均值

Fig.9 Mean distance between picking point and target fruit-stalk contour

采摘点定位在葡萄串所连目标果梗范围内定义为采摘点定位成功, 采摘点定位到背景、葡萄果实以及其他果梗范围内定义为采摘点定位失败(图 10)。采摘点定位算法的复杂度直接影响着葡萄采摘机器人的采摘效率, 对 3 种不同采摘环境下采摘点定位算法运行的时间进行了统计, 得到平均定位时间为 0.65 s(表 1)。定位失败的原因: 第一, 在晴天顺光、晴天逆光情况下受光照影响, 算法分割不稳定, 会直接影响采摘点定位的成功率; 第二, 在自然环境下, 有些葡萄串果梗被树叶遮挡, 检测不到目标果梗; 第三, 多个果梗交错, 干扰较大。

表 1 不同试验条件下葡萄采摘点定位情况

Table 1 Location of grape picking points under different test conditions

试验条件	图像总数 (幅)	采摘点 定位成功 图像数量 (幅)	采摘点 定位失败 图像数量 (幅)	成功率 (%)	平均定位 时间(s)
晴天顺光	40	34	6	85.0	0.65
晴天逆光	40	36	4	90.0	0.62
晴天遮阳	40	37	3	92.5	0.67

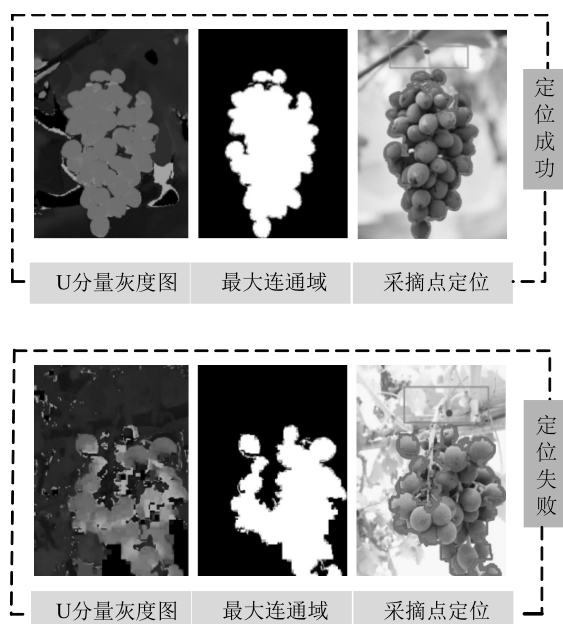


图10 采摘点定位过程示意图

Fig.10 Schematic diagram of picking point positioning

### 3 结论

本研究提出了基于分水岭果梗图像分割和最小角度约束的采摘点定位方法。通过葡萄果实位置信息定位果梗 ROI 区域,根据 ROI 区域中果梗、树叶和背景呈现不同的灰度级,对该区域进行分水岭分割,然后对每个果梗进行二值化操作,最后对分割后的图像进行角点检测。对每个果梗的角点数据进行线性回归分析,将拟合到的直线分别与垂直于地面直线进行角度计算,角度最小的拟合直线所在的果梗作为葡萄串所连的果梗,也就是目标果梗。对目标果梗的角点数据进行  $K$  均值聚类分析,聚类中心作为采摘机器人的最佳采摘点。

利用晴天顺光、晴天逆光、晴天遮阳条件下采集的图像进行验证,采摘点定位成功率为 89.2%,与罗陆锋等<sup>[16]</sup>的结果相比提高了 0.87%,平均定位时间为 0.65 s。葡萄采摘机器人的工作环境存在葡萄串果梗被树叶遮挡和多个果梗交错的情况,所以在未来的工作中,将针对这 2 种情况下的葡萄串采摘点定位进行深入研究。

### 参考文献:

- [1] LUO L F, TANG Y C, ZOU X J, et al. Robust grape cluster detection in a vineyard by combining the AdaBoost framework and multiple color components[J]. Sensors, 2016, 16(12): 2098.
- [2] 罗陆锋,邹湘军,杨洲,等.基于改进人工蜂群模糊聚类的葡萄图像快速分割方法[J].农业机械学报, 2015, 46(3): 23-28.
- [3] 宋西平,李国琴,罗陆锋,等.基于 HSI 色彩空间与 FFCM 聚类的葡萄图像分割[J].农机化研究, 2015, 37(10): 40-44.
- [4] 田锐,郭艳玲.基于机器视觉的葡萄自动识别技术[J].东北林业大学学报, 2008, 36(11): 95-97.
- [5] 马本学,贾艳婷,梅卫江,等.不同自然场景下葡萄果实识别方法研究[J].现代食品科技, 2015, 31(9): 145-149, 168.
- [6] 罗陆锋,邹湘军,王成琳,等.基于轮廓分析的双串叠贴葡萄目标识别方法[J].农业机械学报, 2017, 48(6): 15-22.
- [7] 曾庆兵,刘成良,苗玉彬,等.基于形态学图像处理的重叠葡萄果径无损测量[J].农业工程学报, 2009, 25(9): 356-360.
- [8] 陈英,李伟,张俊雄.基于图像轮廓分析的堆叠葡萄果粒尺寸检测[J].农业机械学报, 2011, 42(8): 168-172.
- [9] MIAO Y B, WANG Z M, LIU Q. Application of Zernike-moment-based watershed segmentation on fruit features extraction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(1): 158-163.
- [10] 杨庆华,刘灿,荀一,等.葡萄套袋机器人目标识别方法[J].农业机械学报, 2013, 44(8): 234-239.
- [11] 张凯,赵丽宁,孙哲,等.葡萄套袋智能机器人系统设计与目标提取[J].农业机械学报, 2013, 44(S1): 240-246.
- [12] 罗陆锋,邹湘军,叶敏,等.基于双目立体视觉的葡萄采摘防碰撞空间包围体求解与定位[J].农业工程学报, 2016, 32(8): 41-47.
- [13] 张同勋,刘平.一种鲜食葡萄采摘点的快速高效识别方法[J].农机化研究, 2020, 42(2): 189-193.
- [14] 熊俊涛,何志良,汤林越,等.非结构环境中扰动葡萄采摘点的视觉定位技术[J].农业机械学报, 2017, 48(4): 29-33, 81.
- [15] LUO L, TANG Y, LU Q, et al. A vision methodology for harvesting robot to detect cutting points on peduncles of double overlapping grape clusters in a vineyard[J]. Computers in Industry, 2018, 99: 130-139.
- [16] 罗陆锋,邹湘军,熊俊涛,等.自然环境下葡萄采摘机器人采摘点的自动定位[J].农业工程学报, 2015, 31(2): 14-21.

(责任编辑:王妮)