

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.07.026

杭白菊采摘机器人关键技术研究*

樊俊¹, 荀一¹, 鲍官军¹, 吴君亮², 杨庆华^{1*}

(1. 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江杭州 310032;
2. 上海沃施园艺股份有限公司, 上海 200072)

摘要:针对杭白菊采摘机械化水平低和人工成本高的问题,研究了杭白菊采摘机器人的本体结构、视觉系统、运动控制系统等方面,设计了一种新型的杭白菊采摘机器人。同时针对杭白菊果实识别的问题,研究了杭白菊的颜色特点和纹理特征,采用了一种基于S分量快速FCM算法的杭白菊果实识别方法,对在顺光和逆光两种不同光照条件下拍摄的杭白菊图像进行了试验。研究表明,该方法能够较好地复杂自然环境中将杭白菊目标快速分割出来,为杭白菊采摘机器人的研制提供了重要参考。

关键词:杭白菊;硬件构成;末端执行器;图像分割

中图分类号:TP242;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)07-0909-06

Key techniques of hangzhou white chrysanthemum picking robot

FAN Jun¹, XUN Yi¹, BAO Guan-jun¹, WU Jun-liang², YANG Qing-hua¹

(1. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 2. Shanghai Worth Garden Co., Ltd., Shanghai 200072, China)

Abstract: Aiming at the problems of the low level of Hangzhou White Chrysanthemum picking mechanization and high labor costs, a walking mechanism, picking arm, an end-effector, vision system and motion control system were researched, a kind of Hangzhou white chrysanthemum picking robot was developed. At the same time, aiming at the problem of fruit identification of Hangzhou White Chrysanthemum, the color feature and texture feature of Hangzhou white chrysanthemum were researched, a new segmentation method for Hangzhou white chrysanthemum that based on the fast FCM algorithm of S component on HSV color space was presented. The Hangzhou white chrysanthemum image in two different light conditions that facing the light and backlight was tested. The results indicate that the proposed method can segment Hangzhou white chrysanthemum quickly and well from the complex natural environment. It can provide some references for the research of agricultural robots.

Key words: Hangzhou white chrysanthemum; hardware structure; end-effector; segmentation of image

0 引言

杭白菊作为茶类饮品的一种,颇受欢迎,在我国的种植面积也在逐渐扩大。由于杭白菊采摘量大、花期

短、品质要求高,导致杭白菊采摘成为杭白菊生产过程中用工量最大,也是实现机械化难度最大的一项作业。目前还没有专用的采摘机械,全部采用人工采摘,劳动强度大、效率低^[1]。国内外涉及杭白菊采摘机器人的

收稿日期:2016-03-21

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2015BAD19B05)

作者简介:樊俊(1990-),男,浙江义乌人,硕士研究生,主要从事机器人技术方面的研究。E-mail: zjut_fj@163.com

通信联系人:杨庆华,男,教授,博士生导师。zjutme@163.com

研究成果非常少。在国外, Kondo 等^[2]较早提出利用葡萄的光谱特性对目标进行识别定位; Arefi 等^[3]将番茄图像在 RGB 颜色空间下利用 R-G 方法去除背景, 然后利用形态学特征定位番茄目标; Bac 等^[4]使用辅助线作为视觉提示环绕在甜辣椒茎秆上以便对目标进行识别定位; Zou 等^[5]提出了一种基于交互式的花卉识别系统; Hong 等^[6-7]提出了一种利用颜色聚类和领域知识的花朵分割算法; Angelova 等^[8]提出一种用于细粒度图像的花卉检测和分割方法。在国内, 张铁中等^[9]利用草莓图像质心和果尖点来对采摘点进行识别与定位; 杨庆华等^[10]通过提取葡萄图像轮廓的外接矩形对目标进行识别与定位; 张浩等^[11]运用光栅投影法对茶叶嫩梢的定位进行了研究。综上可发现, 目前对农业采摘机器人的研究主要集中在果蔬类图像的分割与识别等方面, 花卉的计算机识别技术研究主要针对花卉图像分类, 而对基于采摘机器人的杭白菊自动识别方法的研究未见报道。

实现机器人自动采摘杭白菊的关键技术之一是确定杭白菊果实的采摘点, 运用图像处理技术将杭白菊果实从复杂的背景环境中提取出来, 并基于提取的杭白菊果实几何形状区域准确计算出杭白菊花蕊的外形尺寸和形心位置。

针对杭白菊花蕊、花瓣和背景颜色区别显著的特点, 本研究在设计杭白菊采摘机器人本体的基础上, 提出一种基于 HSV 色彩空间下 S 分量的快速模糊聚类 (FCM) 分割方法, 以实现杭白菊花蕊外部轮廓的提取。

1 杭白菊采摘机器人本体

1.1 总体构架

本研究参考国内外果蔬采摘机器人结构, 并根据杭白菊在垄间的分布特点, 自主构建了杭白菊采摘机器人的总体构架如图 1 所示。采摘机器人主要由一个机械臂、Y 轴方向行走机构、X 轴方向移动导轨、末端执行机构、运动控制系统和视觉系统六部分组成。其中视觉系统包括 3 台 CCD 摄像头、3 块图像采集卡和一台计算机。

1.2 工作原理

杭白菊采摘机器人工作原理如下: 整个机器通过履带驱动前进, 机械手采用倒挂方式, 摄像头 1、2 用于采集收获区域内杭白菊图像, 经过图像分割处理后初步提取该范围内所有成熟杭白菊的形心位置, 按照一定优化算法对采摘顺序进行规划。当末端执行器移动

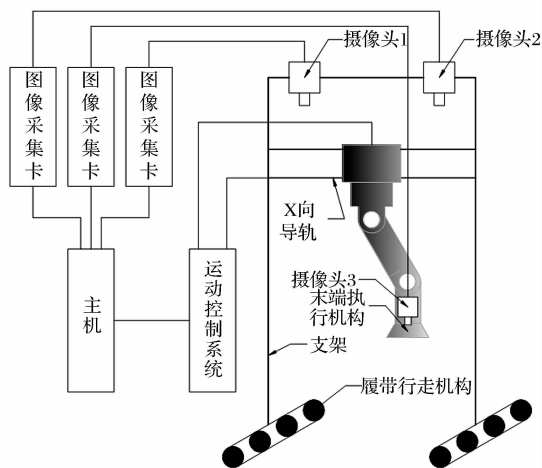


图 1 杭白菊采摘机器人总体构架

到第一朵杭白菊附近的时候, 摄像头 3 采集该杭白菊图像, 通过分割图像提取杭白菊的形心, 驱动末端执行器完成收获动作, 接着进行第二朵杭白菊的采摘。循环上面的操作直到收获区内所有成熟杭白菊都采摘完毕。

2 末端执行器

为了最大限度提高采摘效率, 末端执行器采用抽吸式喇叭口结构通过负压吸摘。具体作业过程如下: 当采摘末端执行器接近目标果实时, 吸尘枪稳定可靠地吸附住杭白菊花蕊表面, 然后气缸动作提升吸尘枪将目标杭白菊从簇状果实中分离出来, 接着肘型气爪驱动爪头闭合, 将目标杭白菊包裹在内, 与其他杭白菊和茎叶隔离, 最后控制机械臂将杭白菊扯断, 使其果柄与果体分离完成采摘。杭白菊采摘末端执行器如图 2 所示。

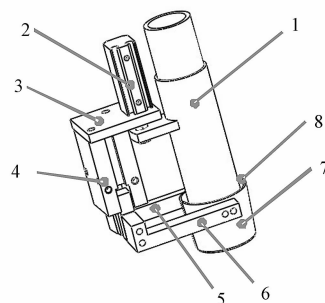


图 2 杭白菊采摘末端执行器

1—吸尘枪吸嘴; 2—气缸; 3—支撑板; 4—气爪;
5—左指; 6—右指; 7—右爪头; 8—左爪头

3 识别算法

3.1 HSV 色彩空间分析及 S 分量模型

该实验的研究对象为桐乡杭白菊试验示范站处于采摘期 (10 月下旬) 的杭白菊。采摘机器人采收

杭白菊时要选晴天露水干后进行,否则容易腐烂、变质、色逊、质差。为此,本研究在晴天上午8:00到下午18:00之间按晴天顺光和晴天逆光2种光照情况对处于自然环境下的杭白菊采集200幅图像,每幅图像像素为720×480,大小0.3M,以JPG格式储存。

HSV色彩空间由A. R. Smith在1978年提出,反映了颜色的直观特性,用色调(Hue),饱和度(Saturation),亮度(Value)来描述色彩^[12],HSV颜色模型是面向用户的,增加黑色可以减小V而S不变,同样增加白色可以减小S而V不变^[13],对于白色物体具有较高的区分度。为了能够进行聚类分割,从中寻找出目标对象聚类特征,该次试验以杭白菊作为研究对象,对比其颜色发现杭白菊花蕊呈黄色,花瓣呈白色。从HSV色彩空间模型上分析,饱和度S大于0.75的部分接近于杭白菊花蕊颜色,饱和度S小于0.18的部分接近于杭白菊花瓣颜色,将S分量归一化处理后,杭白菊花蕊对象以高灰度级凸显,如图4(c)所示。同时,笔者对RGB色彩空间下的R、G、B分量, $L^*a^*b^*$ 空间下的 L^* 、 a^* 、 b^* 分量, $I_1I_2I_3$ 色彩空间下 I_1 、 I_2 、 I_3 分量,HSV空间下的H、V分量,以及多色彩空间下2R-G-B、R-G/R/G、R-I^[14]等多组合分量进行对比分析后,发现S分量能够将杭白菊很好地凸显出来,与图像背景的区分度很高,如图4(b)所示。从直方图统计(图4(d))分析可知:有3个明显的波峰,便于进行聚类分割,也利于基于S分量快速FCM算法聚类进行快速图像分割。因此,首先将RGB图像转换到HSV色彩空间下提取S分量;然后以S分量产生灰度图像将像素值处理统计,统计其在各个灰度级中的频数作为基于S分量快速FCM算法的样本数据。

HSV色彩空间模型如图3所示。

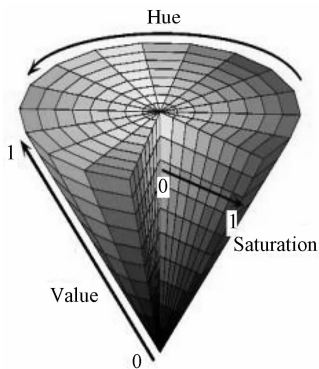
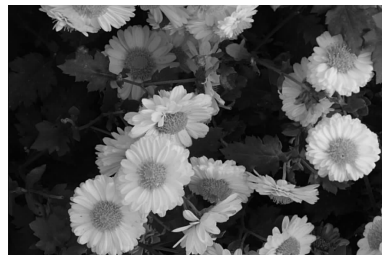
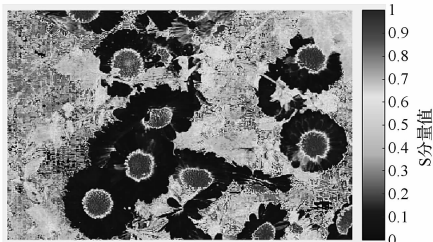


图3 HSV色彩空间模型

杭白菊图像的S分量分析如图4所示。



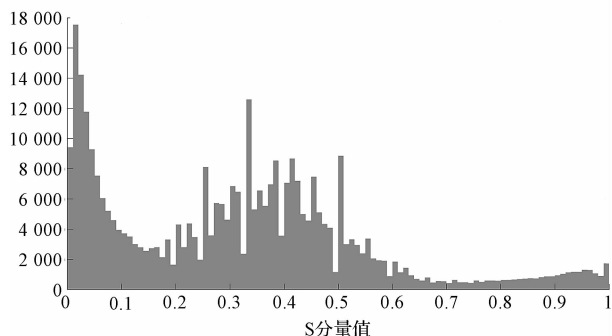
(a) 杭白菊图像原图



(b) S分量像素对比图



(c) S分量灰度图



(d) 灰度统计直方图

图4 杭白菊图像的S分量分析

3.2 传统模糊C-均值聚类(FCM)算法

模糊C均值聚类(FCM:Fuzzy C-Mean)算法是用隶属度确定每个数据点属于某个聚类的程度的一种聚类算法^[15]。聚类算法FCM是由Dumm^[16]首次提出,Bezdek^[17]将其发展和推广,在图像分割应用中,将图像的像素作为聚类的样本数据,进行聚类分割。

设集合 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是特征空间 R^t 上的一个有限样本数据集合,其中 t 是向量 x_i 的维数,然后把样本容量为 n 的数据集合 X 划分为 $c(2 \leq c < n)$ 个模糊组,设个数为 c 的聚类中心集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_c\}$,最后根据最小化整个权重的均方差的思想,使价值目标函数达到最小值。

价值目标函数为

$$J(U, V) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c u_{ij}^m D_{ij} \quad (1)$$

式中: n — 聚类样本数据个数; c — 聚类生成的类别个数; u_{ij} — 第 i 个聚类样本数据点 x_i 属于第 j 类的隶属度 ($u_{ij} \in [0, 1]$); m — 影响聚类结果隶属度平滑程度的加权指数 ($m > 1$); D_{ij} — 第 i 个聚类样本数据点 x_i 到第 j 类聚类中心 v_j 的欧氏距离的平方, 即:

$$D_{ij} = \|x_i - v_j\|^2 = (x_i - v_i, x_i - v_j) \quad (2)$$

U — $n \times c$ 的隶属度矩阵, 是 u_{ij} 的集合, 满足下列条件:

$$\begin{cases} u_{ij} \in [0, 1] & 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq c \\ \sum_{i=1}^n u_{ij} > 0 & 1 \leq j \leq c \\ \sum_{j=1}^c u_{ij} = 1 & 1 \leq i \leq n \end{cases} \quad (3)$$

V — $t \times c$ 的聚类中心矩阵, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_c\}$ 。

根据式(1~3), 采用拉格朗日乘数法求解价值目标函数的最小值, 对所有变量求偏导, 得到使式(1) 价值目标函数最小的必要条件为:

$$v_j = \sum_{i=1}^n \frac{u_{ij}^m}{\sum_{i=1}^n u_{ij}^m} x_i \quad (4)$$

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{\|x_i - v_j\|}{\|x_i - v_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (5)$$

FCM 算法的基本思路是用迭代方法求解式(4) 和式(5), 直至满足某个终止条件。

3.3 基于 S 分量的快速 FCM 算法

通过提取图像中转化为 HSV 色彩空间后的 S 分量, 发现图像中很多像素拥有相同的 S 分量值, 若每个像素作为一个聚类样本数据, 将得到一个冗余的聚类样本数据集, 增加了无谓的计算量, 影响了计算效率。针对待分割的杭白菊图像的特点, 本研究采用如下基于 S 分量的快速 FCM 算法。

首先将图像的 S 分量映射到灰度空间, 在灰度空间内应用 FCM 算法进行聚类, 此时价值目标函数如下:

$$J(U, V) = \sum_{k=1}^{L-1} \sum_{i=1}^c u_{ik}^m D_{ik} \omega(k) \quad (6)$$

式中: L — 聚类样本数据的灰度级个数; c — 聚类生成的类别个数; u_{ik} — 第 k 个灰度级属于第 i 类的隶属度 ($u_{ik} \in [0, 1]$); $\omega(k)$ — 权重系数, 是图像中第 k 个灰度级的像素频数; m — 影响聚类结果隶属度平滑程度的加权指数 ($m > 1$); D_{ik} — 第 k 个灰度级到第 i 类聚类中心 v_i 的欧氏距离的平方, 即:

$$D_{ik} = \|k - v_i\|^2 = (k - v_i, k - v_i) \quad (7)$$

U, V — 隶属度矩阵和聚类中心矩阵。

本研究采用拉格朗日乘数法求解价值目标函数的最小值, 求得使式(6) 价值目标函数最小的必要条件为:

$$v_i = \sum_{k=1}^{L-1} \frac{u_{ik}^m \omega(k)}{\sum_{k=1}^{L-1} u_{ik}^m \omega(k)} k \quad (8)$$

$$u_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{\|k - v_j\|}{\|k - v_i\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (9)$$

3.4 图像分割流程

杭白菊图像分割流程如图 5 所示, 本研究先将采集的杭白菊 RGB 图像转换到 HSV 颜色空间下并提取 S 分量, 统计各个灰度级的频数, 以 256 个灰度级作为数据样本进行聚类分割, 最后经形态学处理、孔洞填充后提取出杭白菊果实区域。

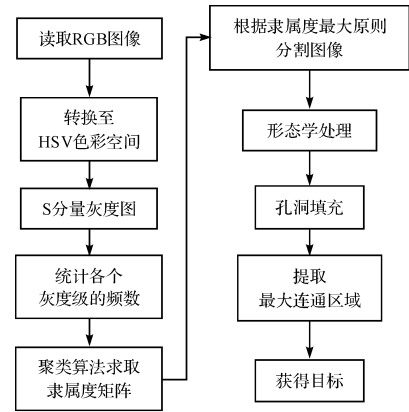


图 5 杭白菊图像分割流程

4 控制系统硬件设计

根据果蔬采摘机器人控制系统的任务要求, 本研究设计的杭白菊采摘机器人控制系统硬件如图 6 所示, 由工控机、数据采集卡、图像采集卡、电机伺服控制和末端执行器控制 5 个子系统组成。

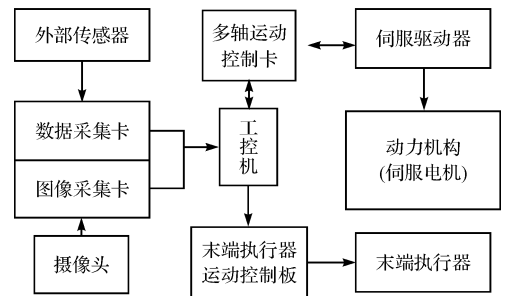


图 6 采摘机器人硬件结构示意图

4.1 上位控制计算机(工控机)

整个采摘机器人控制系统采用上、下位机二级结构, 工控机作为主控制器, 集成了软件和控制界面, 对

整个系统进行控制,通过处理采集卡采集的信息得到机器人关节和末端执行器目标任务,并将任务传递给运动控制器。该系统选用研华 IPC-610I 工控机,CPU 为 P4 3.0、内存为 512 MB 内存、硬盘 40 GB。

4.2 下位控制计算机(运动控制器)

采摘机器人控制系统的下位机负责机器人底层运动控制,解决一般性的运动控制问题,控制运动过程中的位置、速度、加速度等。综合考虑使用性能和经济性,下位机处理器选用 leadshine 公司的 DMC_1380。

DMC_1380 具有较高的运算速度和可靠性,且有良好的扩展性、灵活性和实时性,最多支持 12 块 DMC1380 卡同时工作,一台 PC 机可以同时控制多达 36 轴步进/伺服电机同时工作,可以控制多种不同自由度的机器人以及末端执行器,完全能满足采摘机器人底层控制的性能要求。

5 实验与分析

本研究在顺光、逆光两种不同环境下进行试验,对比 FCM 与基于 S 分量的快速 FCM 算法分割效果与分割速度,通过运用 Matlab2014b 作为图像分割实验工

具,为后续杭白菊采摘机器人人机交互界面的编写提供基础。设定 FCM 与基于 S 分量的快速 FCM 算法中除聚类样本数据外(FCM 聚类样本数据为图像灰度值、基于 S 分量的快速 FCM 算法为图像 256 个灰度级),其余初始参数为:聚类中心个数 $c = 3$,模糊隶属度指数 $m = 1.8$, $\epsilon = 0.001$ 。分割效果如图 7、图 8 所示。

从图 7、图 8 可知:分别采用 FCM 和基于 S 分量的快速 FCM 算法对杭白菊图像进行分割提取目标,两种算法的分割效果差异性不大,都能较好地将目标区域分割出来。经过形态学处理、孔洞填充、与最大连通区域提取后发现:分割方法在逆光光照下的分割效果较好,顺光下对结果会有一些影响;由于根茎、叶子和花朵的遮挡,从分割图像中可以看出处于底部的部分花蕊无法得到完整的外部轮廓;对于被花朵遮挡的杭白菊,只需在上方杭白菊果实采摘完毕之后重新提取被遮挡花蕊外部轮廓即可;对于被根茎和叶子遮挡的杭白菊,则需要通过杭白菊花蕊的形状大小、外部轮廓形状等特征对分割图像中的残缺花蕊进行恢复,以提取完整的花蕊外部轮廓,此类遮挡情况比较复杂,在后续的工作中将深入研究。

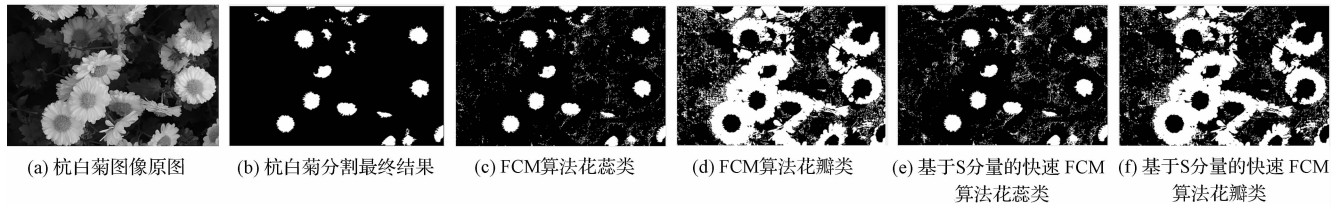


图7 逆光环境下杭白菊图像分割效果

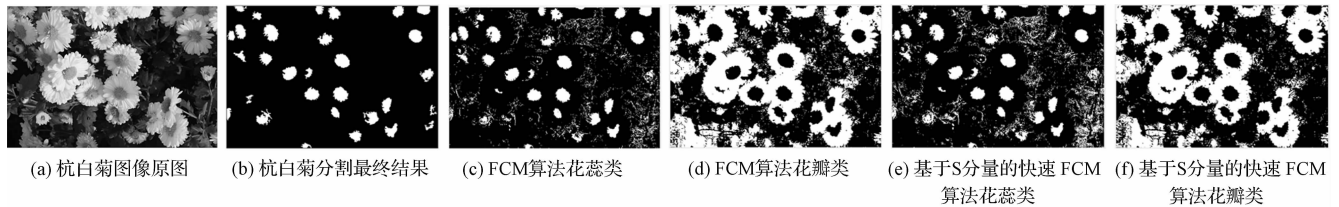


图8 顺光环境下杭白菊图像分割效果

在两种不同光照条件下,本研究对杭白菊图像进行分割,其相似度如表 1 所示,分割速度如表 2 所示。

表 1 两种算法分割相似度

光照条件	FCM 算法的聚类中心			基于 S 分量的快速 FCM 算法的聚类中心		
	花瓣类	背景类	花蕊类	花瓣类	背景类	花蕊类
	逆光	0.075	0.399	0.840	0.080	0.402
顺光	0.129	0.480	0.836	0.132	0.483	0.838

表 2 两种算法分割速度对比

光照条件	FCM 算法			基于 S 分量的快速 FCM 算法		
	迭代次数	每次迭代平均耗时/s	总耗时/s	迭代次数	每次迭代平均耗时/s	总耗时/s
逆光	26	0.221	5.738	8	0.015	0.122
顺光	32	0.223	7.126	10	0.011	0.106

为了方便两种算法聚类中心的比较,本研究对表 1 中的基于 S 分量的快速 FCM 算法的聚类中心数据进行了归一化处理。

从表 1、表 2 可知:基于 S 分量的快速 FCM 算法的

运算精度接近标准 FCM 算法,且迭代次数减少明显,分割时间大大缩短。这表明,基于 S 分量的快速 FCM 算法具有较好的分割性,同时能够较好地快速分割出目标杭白菊。

6 结束语

(1)本研究根据采摘对象的生长环境,设计了机器人本体结构,并结合运动控制卡、机器视觉系统以及工控 PC 机组成了杭白菊采摘机器人试验系统。系统具有良好的扩展性和柔性作业能力,能够满足采摘机器人的作业要求。

(2)基于 S 分量的快速 FCM 算法,本研究将 HSV 色彩空间下的 S 分量映射至灰度空间,以统计的各个灰度级频数作为聚类样本数据集,避免了传统 FCM 算法中因相同灰度级而产生的冗余计算,有效的缩短了聚类时间。

(3)经实验验证分析,在顺光和逆光两种光照条件下,基于 S 分量快速 FCM 算法的杭白菊识别技术能够快速有效的将杭白菊果实从复杂背景中提取出来。

(4)对于花蕊朝下或花蕊被茎叶完全遮挡的杭白菊果实,由于拍摄角度的问题,无法获取含有花蕊特征的图像,基于 S 分量的快速 FCM 算法会失效。在后续的研究中,可将花瓣作为辅助特征,提取杭白菊采摘点位置。

参考文献 (References):

[1] 徐东海,江宝庆. 杭白菊产业机械装备与技术预测分析[J]. 南方农机,2008,39(6):39-40.

[2] KONDO N, SHIBANO Y, MOHRI K, et al. Basic studies on robot to work in vineyard(part 2)[J]. **Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery**, 1994, 56(1):45-53.

[3] AREFI A, MOTLAGH A M, MOLLAZADE K, et al. Recognition and localization of ripen tomato based on machine vision[J]. **Australian Journal of Crop Science**, 2011, 5(10):1144-1149.

[4] BAC C W, HEMMING J, Van Henten E J. Stem localization of sweet-pepper plants using the support wire as a visual cue[J]. **Computers and Electronics in Agriculture**, 2014

(105):111-120.

[5] ZOU J, NAGY G. Evaluation of model-based interactive flower recognition[C]// International Conference on Pattern Recognition. Cambridge: IEEE,2004,311-314.

[6] HONG A, CHI Z, CHEN G, et al. Region-of-Interest based Flower Images Retrieval[C]// International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Hongkong: IEEE,2003:589-592.

[7] HONG A-X, CHEN G, LI J L, et al. A flower image retrieval method based on ROI feature[J]. **Journal of Zhejiang University Science**, 2004, 5(7):764-772.

[8] ANGELOVA A, ZHU S. Efficient Object Detection and Segmentation for Fine-Grained Recognition [C]// International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Poreland: IEEE,2013:811-818.

[9] 张铁中,陈利兵,宋 健. 草莓采摘机器人的研究: II. 基于图像的草莓重心位置和采摘点的确定[J]. 中国农业大学学报,2005,10(1):48-51.

[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 浩,陈 勇,汪 巍,等. 基于主动计算机视觉的茶叶采摘定位技术[J]. 农业机械学报,2014,45(9):61-65.

[12] SMITH A R. Color gamut transformation pairs[J]. **Computer Graphics**, 1978, 12(3):12-19.

[13] 杨其宇,彭 刚,王 敏,等. 基于颜色模型的足球机器人目标识别研究[C]//中国人工智能学会第 10 届全国学术年会论文集. 北京:北京机电大学出版社,2003:929-933.

[14] LEVKOWITZ H, HERMAN G T. GLHS: A generalized lightness, hue, and saturation color model[J]. **CVGIP: Graphical Models and Image Processing**, 1993, 55(4):271-285.

[15] 白素琴,惠长坤,吴小俊,等. 一种基于遗传算法的模糊聚类算法及其与 FCM 算法的结合[J]. 华东船舶工业学院学报:(自然科学版),2001,15(6):40-43.

[16] DUNN J C. A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact well-separated clusters[J]. **Journal of Cybernetics**, 1973, 3(3):32-57.

[17] BEZDEK J C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms [M]. New York: Plenum Press, 1981.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

樊 俊,荀 一,鲍官军,等. 杭白菊采摘机器人关键技术研究[J]. 机电工程,2016,33(7):909-914.

FAN Jun, XUN Yi, BAO Guan-jun, et al. Key techniques of hangzhou white chrysanthemum picking robot[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2016,33(7):909-914.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>