

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2023.09.031

王大明, 何逸霏, 李华英, 等. 柑橘采摘机器人图像识别算法研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(9): 222-226, 264

Wang Daming, He Yifei, Li Huaying, et al. Research on image recognition algorithm of citrus picking robot [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(9): 222-226, 264

柑橘采摘机器人图像识别算法研究^{*}

王大明, 何逸霏, 李华英, 苟于江, 何辉波

(西南大学工程技术学院, 重庆市, 400715)

摘要: 柑橘作为我国重要的水果对增加我国果农收入有重要的作用, 因此柑橘的自动采摘机器人已经成为当下研究的热点。针对柑橘采摘机器人核心的机器视觉部分进行柑橘图像识别算法的设计, 选取 HSV 颜色空间中的 S 分量值作为柑橘识别的颜色特征, 进行图像增强、去噪和分割预处理操作。综合比较 Canny、Sobel、LOG 三种边缘算子下的 Hough 变换, 最终确定柑橘图像识别的最优方案。试验结果表明: 基于 Sobel 边缘检测算子下的 Hough 变换的柑橘识别算法最优, 对单个无枝叶遮挡柑橘识别成功率为 97%, 单个有枝叶遮挡柑橘识别成功率为 90%, 多个柑橘果实重叠识别成功率为 80.6%, 在一定程度上能够有效保证柑橘采摘机器人对柑橘果实的成功识别。

关键词: 柑橘采摘机器人; 柑橘识别; Hough 变换; 机器视觉; 收获机械

中图分类号: S666; TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2023) 09-0222-06

Research on image recognition algorithm of citrus picking robot

Wang Daming, He Yifei, Li Huaying, Gou Yujiang, He Huibo

(College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing, 400715, China)

Abstract: Citrus, as an important fruit in our country, plays an important role in increasing the income of our fruit farmers. Therefore, automatic robots of citrus picking have become a hot topic in recent research. A citrus image recognition algorithm was designed for the core machine vision part of the citrus picking robot. The S-component value in HSV color space was selected as the color feature for citrus recognition to perform image enhancement, denoising and segmentation pre-processing operations. By comprehensively comparing the Hough transform under the three edge operators Canny, Sobel and LOG, we finally determined the optimal solution for citrus image recognition. The experimental results show that the Hough transform based on the Sobel edge detection operator is the best, with a success rate of 97% for a single citrus without branch and leaf shading, 90% for a single citrus with branch and leaf shading, and 80.6% for multiple overlapping citrus. This algorithm can effectively guarantee the probability of successful identification of citrus to a certain extent.

Keywords: citrus picking robots; citrus identification; Hough transform; machine vision; harvesting machinery

0 引言

柑橘是世界第一大类水果作物, 同时也是排名第三的贸易农产品。我国是世界上主要的柑橘贸易、生产大国^[1-3], 国内柑橘产业种植规模持续增长, 种植面积从 1990 年的 1 061.2 km² 增长到 2019 年的 2 617.3 km², 2020 年我国柑橘总产量高达 51 220 kt^[4-5]。

当前我国大部分地区的柑橘采摘方式仍以手工采摘为主, 整个采摘过程不仅效率低且劳动强度大, 所以研发柑橘采摘机器人具有很高的实用价值^[6-7]。近年来, 国内外学者对水果图像处理做了大量的研究^[8-11]。Lu 等^[8]利用颜色信息和图像轮廓对树冠内不同光照下的柑橘进行研究, 通过融合色差信息和归一化 RGB 模型提出了一种初步的分割方法。赵德

收稿日期: 2022 年 3 月 10 日 修回日期: 2022 年 4 月 3 日

^{*} 基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目 (202110635056)

第一作者: 王大明, 男, 1995 年生, 安徽淮南人, 硕士研究生; 研究方向为农业工程与信息技术。E-mail: 2290159874@qq.com

通讯作者: 李华英, 女, 1973 年生, 四川简阳人, 硕士, 副教授; 研究方向为机械设计及理论。E-mail: 1197544155@qq.com

安等^[10]通过对苹果图像进行分割、去噪和确定最小半径等方式,实现了对重叠果实的快速跟踪识别。柑橘图像的识别作为柑橘采摘机器人视觉系统最为核心的部分,必须保证机器人能够正确完成对柑橘的检测。为了满足这一要求,本文对柑橘图像的预处理^[12]、图像分割、形状特征提取以及 Hough 变换进行了研究。首先对颜色空间进行选取,其次图像进行增强处理量作为柑橘的颜色特征,最后通过最大类间差法完成对柑橘图像的分割。综合比较 Sobel、LOG、Canny 等算子,确定最优方案完成对边缘的检测以及其边缘特征的提取。

1 算法设计

为了应对柑橘在自然条件下的复杂生长环境,本文选择应用较为广泛的 HSV 颜色空间来对柑橘图像进行处理。首先通过对柑橘图像增强、去噪,完成对图像的预处理,然后依据果树枝叶与成熟柑橘颜色信息的不同,将图像进行分割得到目标图像^[13],对柑橘特征的提取使用不同边缘检测算子,然后选取合适的腐蚀和膨胀结构元素对目标图像进行形态学处理并结合 Hough 变换完成对柑橘的检测识别,如图 1 所示。

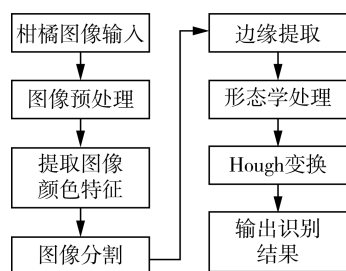


图 1 柑橘识别流程图

Fig. 1 Flow chart of citrus image recognition

1.1 柑橘颜色特征提取

HSV 是为一种比较直观的颜色模型,在 HSV 颜色空间中,它的三个颜色分量之间保持相互独立,尤其是亮度改变并不会对其色调产生影响,这个特性就使得它在图像处理过程中对颜色及亮度的处理十分适合。图 2(b)为柑橘的 H 分量的图像,可以看出柑橘果实呈现深黑色且背景较暗,不能很好地区分柑橘果实与背景;柑橘的 S 分量的图像如图 2(c)所示,图中柑橘果实呈现为较大的白色区域,可以看出它和背景之间存在着较大的差异;图 2(d)为柑橘的 V 分量图像,虽然显示效果较好,但是其受到光照影响较大,当光照很强或者很暗的时候,对于柑橘图像的区分就会产生困难。

S 分量的图能够将柑橘果实从背景图像中较好地区分出来。相比于其他分量的图像来说 S 分量不受图像的色彩信息影响,而其饱和度和色彩分量也更为接近人对色彩的感受。因此,选择 HSV 颜色空间中的 S

分量值作为柑橘识别的颜色特征,并在后续图像处理过程中对 S 分量值进行一系列的处理。

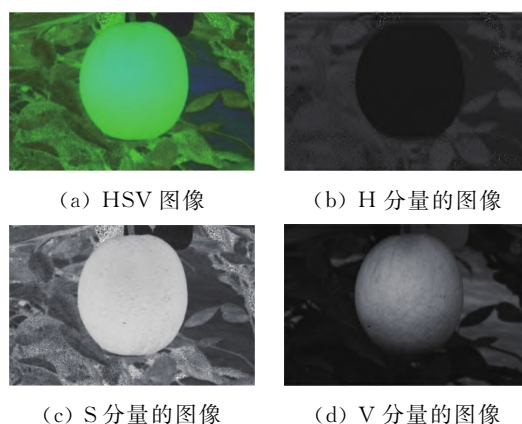


图 2 柑橘不同分量的图像

Fig. 2 Images of citrus' different components

1.2 柑橘图像预处理

图像预处理操作的目的是消除图像中无关的信息,恢复真实有用的信息,增强相关信息的可检测性和最大限度地简化数据,提高特征抽取、图像分割、匹配识别的可靠性^[14]。本文主要用到的预处理操作有直方图均衡化和中值滤波,分别用来对柑橘图像进行增强和去噪。经过直方图均衡化的图像如图 3 所示。可以看出图像在经过直方图均衡化处理后整个图像的对比度有显著提升,说明直方图均衡化可以有效提高图像品质,为后续的图像分割及边缘检测提供保证。

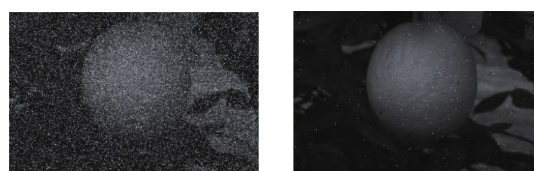


(a) 灰度图 (b) 直方图均衡化后的图像

图 3 直方图均衡化处理

Fig. 3 Histogram equalization

首先通过对柑橘图像进行加噪声处理,加噪处理后的图像如图 4(a)所示,其次再对加噪的图像进行中值滤波处理,经过处理后的图像如图 4(b)所示。可以看出,模糊的加噪图像经过中值滤波处理后,拥有较好的分辨率,能够满足对柑橘图像的降噪要求。



(a) 加噪处理后的图像 (b) 中值滤波后的图像

图 4 滤波处理

Fig. 4 Filter processing

1.3 图形分割

要应用基于阈值分割法中的最大类间差法对图像

进行分析,将目标特征提取出来。最大类间方差法充分考虑了图像灰度及其像素领域之间的关系,把目标与背景之差为最大方差时的阈值作为分割阈值。其最大的优点:不需要人为设置很多参数,就能够自动选取最佳的阈值。

若柑橘图像中的像素数为 n_i ,灰度级以及灰度范围为 $[0, L-1]$ ^[15],则总的像素为

$$N = \sum_{i=0}^{L-1} n_i \quad (1)$$

各个灰度值出现的概率

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad (2)$$

对于 P_i , 有

$$P_i = \sum_{i=0}^{L-1} p_i \quad (3)$$

将图像中所有像素用初始阈值 T 分成 A_0 和 A_1 两类,定义灰度值在 $[0, T-1]$ 的像素为 A_0 , $[T, L-1]$ 的像素为 A_1 ,由此可以得到在区域 A_0 和 A_1 的计算公式为

$$P_0 = \sum_{i=0}^{T-1} p_i \quad (4)$$

$$P_1 = \sum_{i=T}^{L-1} p_i = 1 - P_0 \quad (5)$$

两个区域 A_0 和 A_1 的平均灰度分别为

$$\mu_0 = \sum_{i=0}^{T-1} i p_i = \frac{\mu(T)}{P_0} \quad (6)$$

$$\mu_1 = \frac{1}{P_1} \sum_{i=T}^{L-1} i p_i = \frac{\mu - \mu(T)}{1 - P_0} \quad (7)$$

整幅图像的平均灰度

$$\mu = \sum_{i=0}^{T-1} i p_i + \sum_{i=T}^{L-1} i p_i = P_0 \mu_0 + P_1 \mu_1 \quad (8)$$

经最大间差法处理过后的图像如图 5 所示。

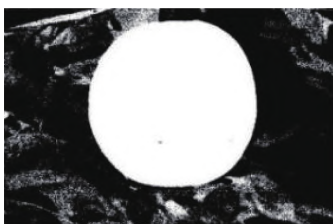


图 5 最大类间差法

Fig. 5 Otsu threshold segmentation image

1.4 边缘算子处理

对分割后的图像进行边缘检测是为了获取图像中的目标轮廓。为了便于确定后续柑橘识别的最优方案。分别采用 Roberts、Sobel、Prewitt、LOG 以及 Canny 算子对图像分割后的柑橘图像进行处理,结果如图 6 所示。

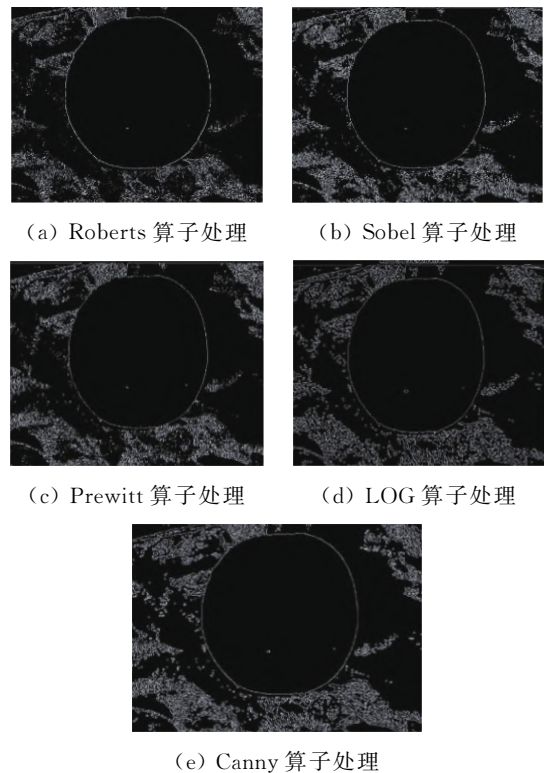


图 6 五种算子的边缘检测

Fig. 6 Edge detection of five operators

通过对比以上几种边缘检测算子检测到的图像,发现 Roberts 算子提取的柑橘图像边缘较粗且存在不同的缺失,柑橘的定位精度也不够高;Sobel 算子和 Prewitt 算子都有着较高的定位精度;LOG 算子提取出的图像定位精度较为完整,但是图像内部相对于其他算子来说有较多的干扰元素;Canny 算子提取的图像具有较好的边缘完整性以及连续性。为了便于后续柑橘识别和确定最优方案。本文选定了 Sobel、LOG 和 Canny 三种算子作为柑橘图像边缘提取方法对柑橘进行边缘检测。

1.5 数学形态学运算

通过边缘算子处理后可以得到柑橘图像的轮廓,但是图像中仍然存在许多的噪声干扰,这会对后续的认识造成一定的影响,降低柑橘的识别率。因此,需要选择合适的腐蚀和膨胀结构处理单元。本文在经过多次试验后,确定了有效的数学形态学处理方案。这个方案采用先腐蚀后膨胀的处理方式,腐蚀的结构元素为 4×4 邻阈元素,膨胀结构元素为 3×3 邻阈元素,腐蚀 10 次,膨胀 10 次。最后,采用开运算去除图像中的细小结构并对孔洞进行填充^[16]。处理以后得到的结果如图 7 所示。

经过 10 次的膨胀腐蚀以及开运算处理以后,柑橘图像的噪声点已经很少,能够较好完成对柑橘轮廓边缘的提取,有利于提高柑橘的识别率。



图 7 数学形态学处理过的图像
Fig. 7 Image processed by mathematical morphology

1.6 Hough 变换圆检测

完成对图像的预处理操作以后,通过 Hough 变换对柑橘的图像进行识别,将图像中某些具有特定形状的边缘轮廓连接起来,从而形成平滑的边缘^[17-19]。柑橘的轮廓特征为椭圆形,较为接近圆形,因此采用 Hough 变化圆检测来实现对柑橘的识别。

2 试验结果

试验分为三组进行测试,每组共 100 张照片,且均含背光、向光两种类型,每组中背光、向光的照片数量随机分布。第一组采用单个无枝叶遮挡的柑橘果实进行采集;第二组采用单个有枝叶遮挡柑橘果实进行采集;第三组采用多个柑橘果实重叠的照片进行采集。柑橘果实照片均采用魅蓝 note6 进行拍摄。为了防止无关因素对试验结果的影响,将每一张图片设置为同样的参数,具体图像参数设置如表 1 所示。

表 1 图像参数设定
Tab. 1 Image parameter setting

参数	取值
圆半径步长/像素	1
角度步长/rad	0.17
最大圆半径/像素	430
最小圆半径/像素	460
阈值百分比	0.9

表 1 中半径的大小都是根据采集得到的图片像素确定的,每一张图片的像素均为 1 944×2 592。

2.1 单果无枝叶遮挡

分别用 Sobel、LOG 和 Canny 三种边缘检测算子下的 Hough 变换来对单个无枝叶遮挡果实进行识别,从而确定最优的柑橘识别算法,试验结果如表 2 所示。

通过表 2 中的数据可以看出 Sobel 算子和 Hough 变换圆检测的方案识别时间虽然不是三组之中最快的,但是其与 LOG 算子与 Hough 变换的差距只有 0.109 4 s,且 Sobel 算子和 Hough 变换圆检测的成功识别率高达 97%,明显优于其他两种方案,同时在试验过程中发现无论柑橘是处于向光环境还是背光环境,均能够被正确地识别。由此说明,使用该方案无论是向光还是背光,环境对柑橘识别算法的使用影响不

大。向光和背光环境下的柑橘识别结果如图 8 所示。

表 2 单果无枝叶遮挡试验结果
Tab. 2 Results of the single-fruit no-branch-shade test

算法	识别个数/个	识别率/%	时间/s
Sobel 算子+Hough 变换	97	97	3.656 3
Canny 算子+Hough 变换	91	91	3.9.63
LOG 算子+Hough 变换	87	87	3.546 9



(a) 向光环境 (b) 背光环境

图 8 单个无枝叶遮挡的柑橘识别
Fig. 8 Experimental results of citrus recognition

2.2 单果有枝叶遮挡

自然环境中,单个无枝叶遮挡的柑橘果实是一种较为理想的状态,然而柑橘的采摘环境是非常复杂的,会出现柑橘果实被枝叶遮挡以及多个果实重叠的现象。为了研究上文所确定的最优算法,对复杂情况下的柑橘图像识别的成功率进行了两组试验。随机采用 100 张向光、背光的单个有枝叶遮挡柑橘果实进行试验,结果如表 3 所示,识别结果如图 9 所示。可以看出,对单个有枝叶遮挡的柑橘识别成功率为 90%。

表 3 单果有枝叶遮挡试验结果
Tab. 3 Results of single fruit with branch and leaf shading test

项目	数值
识别个数/个	90
识别率/%	90



(a) 向光环境 (b) 背光环境

图 9 单个有枝叶遮挡的柑橘识别
Fig. 9 Identification of a single citrus shaded by branches and leaves

2.3 多果实重叠有枝叶遮挡

随机采用 100 张向光、背光的多个柑橘果实重叠的照片进行识别,每张图片至少含有 2 个以上的柑橘果实,并且存在大量枝叶遮挡的情况。对这 100 张图片中的柑橘果实数量进行人工统计,柑橘果实的总数为 326 个。试验结果如表 4 所示,识别的结果如图 10 所示。可以看出,在多个柑橘果实重叠且有枝叶遮

挡的条件下,该算法识别成功率达 80.6%。

表 4 多果实重叠有枝叶遮挡试验结果
Tab. 4 Multiple fruit overlap with branch and leaf shading test results

项目	数值
统计总数/个	326
识别总数/个	263
识别率/%	80.6



(a) 三个柑橘 (b) 两个柑橘

图 10 多个柑橘的识别图像

Fig. 10 Recognition images of multiple citrus

综合以上三组试验结果,分析部分柑橘果实图像识别失败的原因,由于柑橘并非绝对意义上的圆形,同时又存在枝叶遮挡以及多个果实重叠的现象,导致提取的目标特征并非圆形。因此,在利用 Hough 圆检测的时候会存在着错误识别的情况。

3 结论

本文针对柑橘采摘机器人的图像识别算法进行了设计,通过选取 HSV 颜色空间中的 S 通道分量作为柑橘的颜色特征以降低光强对柑橘识别的影响。同时,分别采用 Sobel、LOG 以及 Canny 三种不同边缘检测算子结合 Hough 变换对算法进行设计,最终由试验结果比较得出柑橘识别算法的最优方案。

1) 试验结果显示基于 Sobel 算子下的 Hough 变换对单个无枝叶遮挡柑橘识别的成功率最优,高达 97%,该算法能够有效完成单个无枝叶遮挡的柑橘果实的识别。

2) 同等条件下对单个有枝叶遮挡的柑橘识别成功率为 90%,考虑到枝叶对柑橘果实的遮挡会对图像识别产生一定影响,但仍然具有较好的识别效果。

3) 在多个柑橘果实重叠且有枝叶遮挡的条件下,该算法识别成功率达 80.6%,在一定程度上能够对多个重叠柑橘果实进行有效的识别,识别率降低的原因可能是柑橘果实重叠以及枝叶的遮挡造成图像的圆形特征被破坏,导致识别率成功率下降。

参 考 文 献

[1] 温哈秋子,郑永强,刘杨. 柑橘大数据研究与应用[J]. 农业大数据学报, 2021, 3(1): 33-44.

[2] 奎国秀,祁春节. 我国柑橘产业生产贸易的变化及机遇与挑战[J]. 中国果树, 2021(6): 93-97.
Kui Guoxiu, Qi Chunjie. Changes, opportunities and challenges of citrus production and trade in China [J]. China Fruits, 2021(6): 93-97.

[3] 余佳佳,饶洪辉,罗式挺,等. 南丰蜜桔机械采摘现状和发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(2): 135-138, 158.
Yu Jiajia, Rao Honghui, Luo Shiting, et al. Status and development trend of machinery picking Nanfeng citrus [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(2): 135-138, 158.

[4] 李玉萍,叶露,梁伟红,等. 我国柑橘类地理标志产品发展现状与路径[J]. 中国果树, 2021(12): 93-98, 108.
Li Yuping, Ye Lu, Liang Weihong, et al. Development status and path of citrus geographical indication products in China [J]. China Fruits, 2021(12): 93-98, 108.

[5] 中华人民共和国国家统计局. 中国年鉴[M]. 北京: 中国统计出版, 2021.

[6] 张潞. 自然环境下的柑橘自动采摘关键技术研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2020.

[7] 杨长辉,刘艳平,王毅,等. 自然环境下柑橘采摘机器人识别定位系统研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 14-22, 72.
Yang Changhui, Liu Yanping, Wang Yi, et al. Research and experiment on recognition and location system for citrus picking robot in natural environment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 14-22, 72.

[8] Lu J, Sang N. Detecting citrus fruits and occlusion recovery under natural illumination condition [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 110: 121-130.

[9] Kurthmus F, Lee W S, Vardar A. Green citrus detection using ‘eigenfruit’, color and circular Gabor texture features under natural outdoor conditions [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 78(2): 140-149.

[10] 赵德安,沈甜,陈玉,等. 苹果采摘机器人快速跟踪识别重叠果实[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 22-28.
Zhao De'an, Shen Tian, Chen Yu, et al. Fast tracking and recognition of overlapping fruit for apple harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(2): 22-28.

[11] 刘丽娟,窦佩佩,王慧. 自然环境下重叠与遮挡苹果图像识别方法研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(6): 174-181.
Liu Lijuan, Dou Peipei, Wang Hui. Image recognition algorithm research of overlapped apple fruits in the natural environment [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(6): 174-181.

- fund [J]. *Statistics & Decision*, 2018, 34(12): 90–93.
- [21] Njoya E, Seetaram N. Tourism and poverty reduction in Kenya: A dynamic CGE analysis [J]. *Journal of Travel Research*, 2017, 55(3): 1–27.
- [22] 霍瑜, 张俊飏, 陈祺琪, 等. 土地规模与农业技术利用意愿研究——以湖北省两型农业为例[J]. *农业技术经济*, 2016(7): 19–28.
- Huo Yu, Zhang Junbiao, Chen Qiqi, et al. Research on land scale and willingness to use agricultural technology: An example of two types of agriculture in Hubei Province [J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2016(7): 19–28.
- [23] 张莎莎, 郑循刚. 农户相对贫困缓解的内生动力[J]. *华南农业大学学报(社会科学版)*, 2021, 20(4): 44–53.
- Zhang Shasha, Zheng Xungang. Endogenetic impetus on relative poverty of rural households [J]. *Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition)*, 2021, 20(4): 44–53.
- [24] 沈栩航, 李浩南, 李后建. 创业会加剧农村内部收入不平等吗[J]. *农业技术经济*, 2020(10): 33–47.
- Shen Xuhang, Li Haonan, Li Houjian. Will entrepreneurship exacerbate income inequality in rural areas? [J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2020(10): 33–47.
-
- (上接第 136 页)
- [16] Börnhorst M, Deutschmann O. Advances and challenges of ammonia delivery by urea-water sprays in SCR systems [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2021, 87: 100949.
- [17] Koebel M, Elsener M, Kleemann M. Urea-SCR: A promising technique to reduce NO_x emissions from automotive diesel engines [J]. *Catalysis Today*, 2000, 59(3–4): 335–345.
- [18] 陈镇超, 杨卫娟, 周俊虎, 等. 尿素催化水解特性实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(35): 41–46.
- Chen Zhenchao, Yang Weijuan, Zhou Junhu, et al. Experimental investigation on the properties of urea thermohydrolysis with catalysts [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(35): 41–46.
- [19] 吕洪坤, 杨卫娟, 周俊虎, 等. 尿素溶液高温热分解特性的实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(17): 35–40.
- Lü Hongkun, Yang Weijuan, Zhou Junhu, et al. Investigation on thermal decomposition characteristics of urea solution under high temperature [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(17): 35–40.
- [20] Piazzesi G. The catalytic hydrolysis of isocyanic acid (HNCO) in the Urea-SCR process [D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2006.
- [21] 张晨. 船舶柴油机 Urea-SCR 系统中 HNCO 水解特性及还原作用的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [22] 周英贵, 金保昇. 尿素水溶液雾化热分解特性的建模及模拟研究[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(26): 37–42.
- Zhou Yinggui, Jin Baosheng. Simulation and modeling on thermal decomposition characteristics of urea-water-solution atomization [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(26): 37–42.
-
- (上接第 226 页)
- [12] 李杨. 基于双目视觉的柑橘采摘机器人目标识别及定位技术研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2017.
- [13] 周洪刚, 康敏. 基于机器视觉的成熟柑橘自动识别研究[J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(6): 380–381.
- [14] 顾思妍. 机器视觉的直线检测技术及应用研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2011.
- [15] 张洪超, 侯德文. 一种基于多阈值迭代方法的图像分割算法[J]. *山东师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 31(2): 49–52, 56.
- Zhang Hongchao, Hou Dewen. An image segmentation algorithm based on iterative multiple threshold [J]. *Journal of Shandong Normal University (Natural Science)*, 2016, 31(2): 49–52, 56.
- [16] 张凯兵, 赵珮含. 基于 HOG 特征和 SVM 的日常运动行为识别[J]. *湖北工程学院学报*, 2018, 38(6): 55–61.
- Zhang Kaibing, Zhao Peihan. Daily sports action recognition based on HOG feature and SVM [J]. *Journal of Hubei Engineering University*, 2018, 38(6): 55–61.
- [17] 林耀海, 赵洪璐, 杨泽灿, 等. 结合深度学习与 Hough 变换的等长原木材积检测系统[J]. *林业工程学报*, 2021, 6(1): 136–142.
- Lin Yaohai, Zhao Honglu, Yang Zecan, et al. An equal length log volume inspection system using deep-learning and Hough transformation [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2021, 6(1): 136–142.
- [18] 段志达, 魏利胜, 刘小琿, 等. 基于 Hough 变换圆检测和边缘模板匹配的轴承缺陷检测与定位[J]. *安徽工程大学学报*, 2020, 35(4): 60–68.
- Duan Zhida, Wei Lisheng, Liu Xiaohui, et al. Bearing defect detection and location based on Hough transform circle detection and edge template matching [J]. *Journal of Anhui Polytechnic University*, 2020, 35(4): 60–68.
- [19] 龚昕, 张楠. 基于 Hough 变换的圆检测算法的改进[J]. *信息技术*, 2020, 44(6): 89–93, 98.
- Gong Xin, Zhang Nan. Improvement of circle detection algorithm based on Hough transform [J]. *Information Technology*, 2020, 44(6): 89–93, 98.