

夜间自然环境下荔枝采摘机器人识别技术

熊俊涛 林睿 刘振 何志良 杨振刚 卜榕彬

(华南农业大学数学与信息学院, 广州 510642)

摘要: 利用机器视觉实现自然环境下成熟荔枝的识别,对农业采摘机器人的研究与发展具有重要意义。本文首先设计了夜间图像采集的视觉系统,然后选取了白天和夜间两种自然环境下采集荔枝图像,分析了同一串荔枝在白天自然光照与夜间LED光照下的颜色数据,确定了YIQ颜色模型进行夜间荔枝果实识别的可行性。首先选择夜间荔枝图像的I分量图,利用Otsu算法分割图像去除背景,然后使用模糊C均值聚类算法分割果实和果梗图像,得到荔枝果实图像;再利用Hough圆拟合方法检测出图像中的各个荔枝果实。荔枝识别试验结果表明:夜间荔枝图像识别的正确率为95.3%,识别算法运行的平均时间为0.46 s。研究表明,该算法对夜间荔枝的识别有较好的准确性和实时性,为荔枝采摘机器人的视觉定位方法提供了技术支持。

关键词: 荔枝; 采摘机器人; 识别; 夜间图像; Hough圆检测

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)11-0028-07

Visual Technology of Picking Robot to Detect Litchi at Nighttime under Natural Environment

XIONG Juntao LIN Rui LIU Zhen HE Zhiliang YANG Zhen'gang BU Rongbin

(College of Mathematics and Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Fruit and vegetable production occupy an important position in agriculture with wide market and huge economic benefit. Currently, due to the diversity of picking object, most of fruit harvesting in our country depends on manual work. It's not only time-consuming, but also technic-demanding. The labor cost of harvesting tends to occupy one-third to one-half of the whole labor cost in fruit production process. Thus, fruit harvesting robot needs to be developed to increase the efficiency and lower the costs. Since the working task of harvesting robot grows in natural environment with various shapes and complex structure, visual system needs to be built to recognize the target. This article focusing on litchi picking process, a visual system for litchi images was built and used to recognize litchi. Firstly, a visual system for litchi picture acquisition was built and a method of nighttime litchi recognition and picking point calculation was proposed. For comparison, pictures of same cluster of litchis were captured at daytime with different natural illumination and nighttime with artificial illumination. By analyzing color features of same litchi picture in different color models, the YIQ color model was proved to be the model with best practicability for nighttime litchi recognition and picking point calculation. The background of nighttime picture was firstly removed using Otsu algorithm, then fruit was segmented from stem using Fuzzy C-means clustering algorithm. Circle detection was performed to recognize fruits respectively using Hough circle fitting method. The experiments showed that nighttime litchi recognition accuracy was 95.3% with the average recognition time of 0.46 s, and the method for litchi recognition at night time had better accuracy and higher real-time. This research provided technical support for visual localization technology of litchi picking robots. Based on machine vision, the recognition of litchi fruit was realized. It could provide technical support for litchi picking robot, bring practical significance with high harvest efficiency and low labor cost.

Key words: litchi; picking robot; recognition; nighttime image; Hough circle detection

收稿日期: 2017-04-07 修回日期: 2017-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(31201135、31571568)、广东省科技计划项目(2015A020209123)和广州市科技计划项目(201506010081)

作者简介: 熊俊涛(1981—),男,副教授,主要从事农业机器人和智能设计与制造研究,E-mail: xiongjt2340@163.com

引言

果蔬采摘机器人已经逐步深入到农业生产^[1]。开发具有视觉功能的智能果蔬采摘机器人,对于提高农业生产力有极大的应用价值与现实意义^[2]。

采摘机器人的工作环境为非结构化的自然环境,在自然环境中存在着各种随机因素,因此实现自然环境下采摘机器人对目标的视觉精确定位有很大的难度^[3-4]。当前采摘机器人视觉技术的研究中,因视觉定位会受到自然环境中各种因素的干扰,特别是自然光造成视觉的识别误差,因此一些采摘机器人的视觉技术研究选择在温室环境下进行^[5-6]。JIANG 等^[7]进行了温室环境下番茄、柑橘等的识别定位研究,采用双目立体视觉技术获取温室内果蔬的三维位置信息,实验结果表明,无论在顺光或逆光环境下,该识别模型都可以识别出柑橘,正确识别率较高。文献[8-9]中温室黄瓜采摘机器人,分别对黄瓜和叶子的光谱学特性进行分析,并根据光谱学特性差异对黄瓜进行识别,实验结果表明黄瓜的识别正确率为 83.3%。

在温室环境下,减弱了自然光照对视觉识别结果的影响,但是不能完全避免自然光照的影响。针对这种情况,一些研究者进行了夜间环境下采摘机器人的视觉技术研究^[10-11]。LIU 等^[12]设计了夜间苹果的采集试验,利用 BP 神经网络在 RGB 和 HSI 颜色空间训练样本进行苹果图像分割,该研究有效提高了自然环境中苹果的识别,但是当苹果存在重叠情况,以及夜间产生较多阴影遮挡果实时会存在较大误差。FU 等^[13]进行了猕猴桃的夜间图像识别研究,通过设计夜间照明及视觉系统来采集猕猴桃的图像,在 $R-G$ 颜色空间进行猕猴桃的识别,试验结构表明识别准确率达到了 88.3%。

世界上有三分之一的荔枝生产自我国南方,因此进行荔枝采摘机器人的视觉研究,对农业机械自动化的发展有重要意义^[14]。

已有荔枝视觉识别技术的研究主要集中在白天自然环境下,例如郭艾侠等^[15]针对荔枝果与结果母枝的特点、光照与环境的特殊性及不确定性,提出了探索性分析与荔枝图像识别的融合方法。熊俊涛等^[16]针对不同光照条件的荔枝彩色图像,采用 Retinex 图像增强和 H 分量旋转的方法处理后进行分割。彭红星等^[17]提出了一种基于二次 Otsu 算法的野外荔枝多类色彩目标快速识别方法。这些研究中,荔枝视觉识别的精度很大程度受到了自然光照的影响,因此提高视觉的识别精确度,避免自然光的干扰是主要考虑因素之一。

本文在前人研究的基础上,提出夜间荔枝的视觉识别方法,为夜间荔枝采摘机器人的视觉定位提供技术支持。通过对夜间荔枝图像进行颜色特征分析,确定合适的颜色模型进行荔枝图像分割,然后结合 Otsu 算法与模糊 C 均值聚类法进行夜间荔枝果实图像分割,实现夜间成熟荔枝果实快速准确的识别,将为机器人夜间作业提供理论基础,以及为采摘机器人的智能化发展提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 视觉系统

本研究的视觉系统由 CCD 摄像机、LED 灯、支架等硬件组成。CCD 摄像机是维视公司生产的 MV-E800C 型,最大分辨率为 $3\,312$ 像素 $\times$ $2\,496$ 像素。LED 光源是美国 CREE 公司生产的 XREWHT-L1-Q5 型灯珠,色温 $5\,700 \sim 7\,000$ K,光通量为 $93.9\text{LM} - 100\text{LM/W}$,典型视角 90° ,能在夜间环境下提供有效的稳定光源。荔枝图像的采集方式为:光源距荔枝果实 $500 \sim 1\,000$ mm,与摄像头位于同一垂线,平行于拍摄方向。图像采集的地点是广东省农业科学院荔枝园,时间是 2016 年 6 月 25 日—7 月 15 日,荔枝品种是糯米糍,共采集 526 幅彩色图像,图像分辨率为 $2\,992$ 像素 $\times$ $2\,000$ 像素,荔枝图像采集视觉系统示意图如图 1 所示。

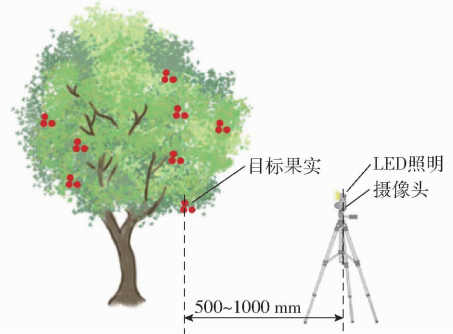


图 1 荔枝图像采集视觉系统示意图

Fig. 1 Visual system diagram of litchi picture acquisition

为了比较白天和晚上采集的荔枝图像,使用该视觉系统在同一天分别在白天自然光照下和夜间进行荔枝图像的采集。其中,白天在自然光照条件下采集图像,夜间利用 LED 灯的光照条件进行图像采集并筛选出 240 幅白天荔枝图像和 240 幅夜间荔枝图像,如图 2 所示。

1.2 果实识别算法

利用图像处理技术识别自然环境下果实的关键是确定合适的颜色模型。本研究对荔枝的彩色图像进行颜色特征分析,针对采集的白天与夜间的荔枝图像,进行颜色数据分析,根据生长环境中不同光照

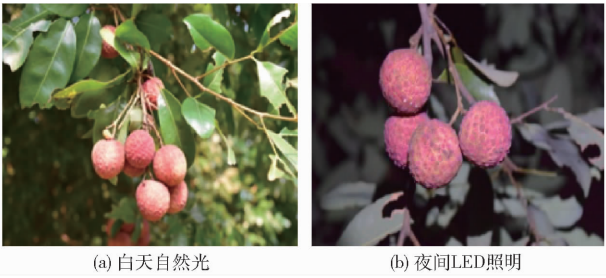


图 2 白天和夜间的荔枝图像

条件下荔枝果实、果梗、树叶、枝杆的图像数据,找出适合在夜间识别荔枝的颜色分量。然后使用所选分量对荔枝进行识别,本研究的算法流程如图 3 所示。

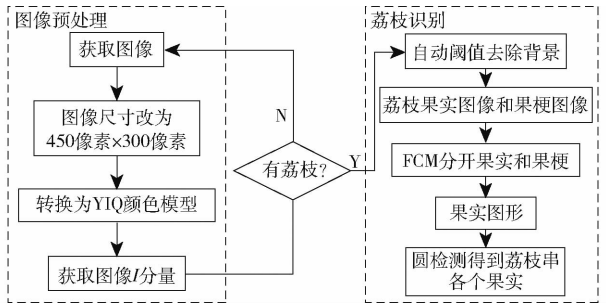


图 3 夜间荔枝识别算法流程图

Fig. 3 Flow chart of litchi nighttime recognition algorithm

1.2.1 图像数据分析

本文选取了白天和夜间的荔枝果实、果梗和树叶的图像,在不同颜色模型(RGB、HSV、Lab、YIQ)下进行对比分析,4个颜色模型的颜色分量箱线图如图 4 所示。由图 4 可以发现,因为白天背光拍的图像会变暗,顺光产生光斑,导致白天背景(树叶和果梗)灰度分布范围更广,而相比白天图像在 HSV、

Lab 和 YIQ 3 个颜色模型下的特征,夜间荔枝图像中背景灰度分布范围比白天小,荔枝灰度与背景灰度的重叠部分明显比白天小。

同时对比 RGB、HSV、Lab、YIQ 4 个颜色模型,从图 4 中可发现,RGB 和 HSV 颜色模型下,无论是白天还是夜间,荔枝与背景的灰度在 3 个分量下都存在很明显的重叠部分,在 Lab 颜色模型的 a 分量和 YIQ 颜色模型的 I 分量下荔枝与背景灰度重叠部分都较小,而在这 2 个分量下,夜晚荔枝灰度与背景灰度重叠部分又比白天小。分析夜间 a 分量和 I 分量图像特征,在夜间 a 分量和 I 分量下果梗与荔枝灰度都有一点重叠部分,但相比之下 I 分量更少一点,并且 I 分量下树叶和果梗灰度分布范围比 a 分量小。另外从算法的实时性分析,RGB 转换为 Lab 颜色模型是非线性的,而 RGB 转换为 YIQ 颜色模型是线性的,选择 YIQ 颜色模型的算法运行速度会相对较快。综上所述,本研究选用 YIQ 颜色模型进行夜间环境下的荔枝识别,并对 YIQ 颜色模型下的颜色特征进行进一步的分析。

选择 240 幅夜间 LED 光照下的荔枝图像进行 Y 、 I 、 Q 颜色分量灰度的统计分析,得到了夜间荔枝果实、果梗和树叶在 Y 、 I 、 Q 颜色分量的灰度均值范围,如表 1 所示。从表 1 可得,夜间条件下荔枝果实 I 分量灰度分布区间为 25 ~ 91,果梗的 I 分量灰度分布区间为 14 ~ 26,树叶的 I 分量灰度分布区间为 0 ~ 16,这表明夜间环境下的荔枝图像中果实与果梗、树叶的 I 分量灰度平均值分布区域重叠很少,比较适合进行荔枝果实图像识别的算法分割,因此本

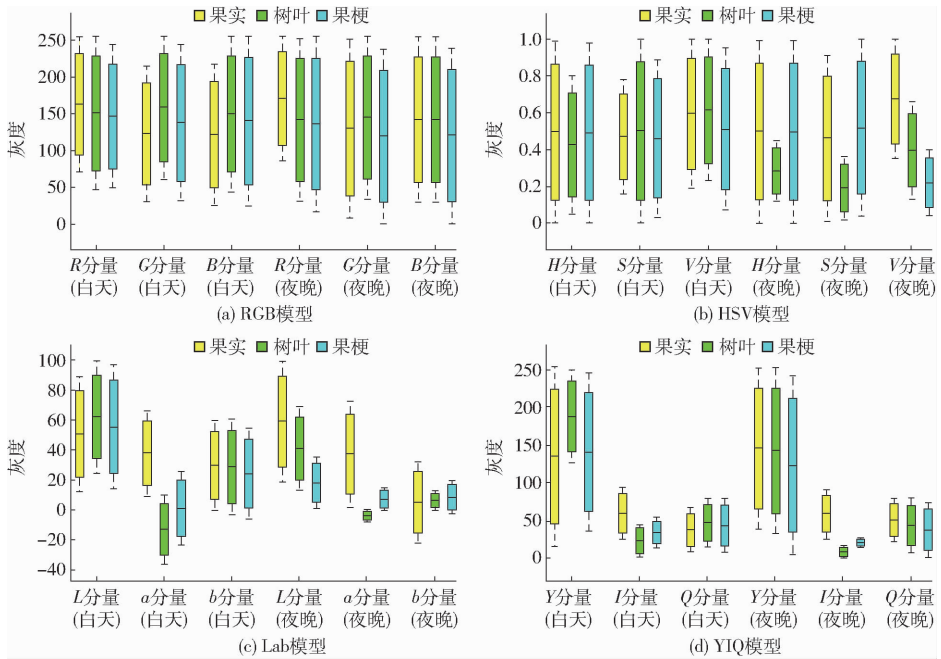


图 4 荔枝不同部位在 4 种颜色模型下的各颜色分量箱线图

Fig. 4 Various color component distribution graphs of different parts of litchi in four color models

文选择 YIQ 颜色模型的 I 分量进行夜间荔枝的识别。

表 1 荔枝不同部位的 YIQ 颜色模型分量灰度统计

Tab.1 Grayscale range of different parts of litchi in YIQ color model

颜色分量	类别	灰度
Y	果实	38 ~ 253
	树叶	32 ~ 254
	果梗	4 ~ 243
I	果实	25 ~ 91
	树叶	0 ~ 16
	果梗	14 ~ 26
Q	果实	21 ~ 79
	树叶	7 ~ 79
	果梗	0 ~ 74

1.2.2 判断图像中存在的荔枝

在图像分割之前首先要判断图像中是否有荔

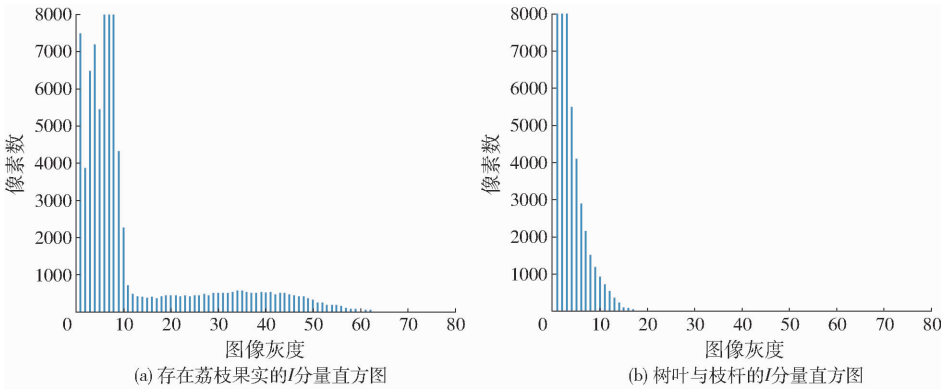


图 5 YIQ 颜色空间的 I 分量图像直方图

Fig.5 Histograms of image based on I component in YIQ color model

1.2.3 荔枝果实的识别算法

通过分析夜间荔枝图像的灰度直方图,选择 Otsu 与 FCM (Fuzzy C-means clustering algorithm) 结合的方法进行荔枝果实的识别。其实现过程为:

(1)荔枝图像背景的去除。利用 Otsu 方法去除荔枝果实和果梗外的背景,获得果实与果梗图像,如图 6b 所示。Otsu 方法的基本思路是将灰度图像分成两组并计算两组的方差,当两组之间的方差最大

枝,在 YIQ 颜色模型中,荔枝果实、树叶、枝杆的 I 分量直方图如图 5 所示。其中图 5a 代表图像中存在荔枝果实的 I 分量灰度分布情况,图 5b 代表无荔枝果实图像的 I 分量灰度分布情况,由图 5 可发现,树叶、枝杆的 I 分量像素数主要集中在灰度小于 25 的区域,而灰度大于 25 的区域主要是荔枝果实的 I 分量像素数,因此,根据 I 分量图中灰度大于 25 的像素数占整个 I 分量图像像素数的比例来判断夜间图像中是否存在荔枝。

本文选取摄像头与目标距离在 500 ~ 1 000 mm 内采集的夜间荔枝图像,进行 I 分量直方图的分析与统计,设定 I 分量图像灰度大于 25 的像素数为 a ,整个 I 分量灰度图的像素数为 b ,通过对 100 幅夜间荔枝图像的统计,确定了当满足

$$\frac{a}{b} > 0.0342$$

(1)

时,图像中存在荔枝果实。

时,就以这个灰度为阈值分割图像^[18]。

(2)利用改进的 FCM 方法进行图像分割,得到荔枝果实和果梗,最终得到荔枝果实图像,如图 6c 所示。传统的 FCM 算法中聚类种子数是根据图像灰度变化的,本文根据荔枝图像 I 分量直方图分布规律,对直方图进行波峰的检测,根据波峰数来确定种子数,如果波峰为 n ,则种子数为 $n + 1$ 。通过分析夜间荔枝果实和果梗图像,确定 FCM 算法的种子

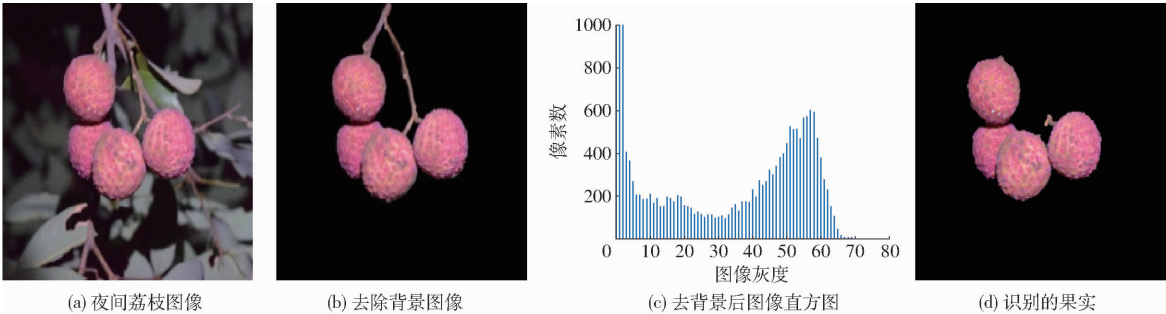


图 6 夜间荔枝识别效果

Fig.6 Recognition effect of litchi in nighttime

数,选择固定值为 2,从而提高 FCM 算法的效率。

1.2.4 Hough 圆检测

对图像分割得到的荔枝果实图像进行 Hough 圆检测,确定果实串中的各个单独果实。Hough 圆检测算法的关键是确定拟合圆的半径范围,才能实现精确快速的圆拟合^[19]。为确定 Hough 圆拟合时半径 r 的取值范围,设计试验计算圆拟合半径的取值范围,其过程为:选取一颗中等大小荔枝,在距离摄像头 500 ~ 1 000 mm 范围内,每隔 50 mm 采集 1 幅图像,计算每幅图像中荔枝果实半径对应的像素数,最后根据半径 r 与深度距离 d 的关系

$$r = \frac{1\,000 - d}{500} \times 50 + 30 \tag{2}$$

同时结合图像尺寸改变后的比例,得到最终 Hough 圆拟合取值的半径范围。

利用 Canny 算子进行荔枝果实的边缘检测,得到荔枝果实串的边缘图。然后基于式(2)进行 Hough 圆拟合半径取值,对得到的荔枝边缘图像进行处理,最终得到 Hough 圆拟合的各个荔枝果实,其中为了提高 Hough 变换的效率和精度,对 Hough 圆拟合算法进行优化,具体思路参考文献[20]。如图 7 所示,夜间荔枝图像的 Hough 圆检测结果表明此方法能准确得到荔枝串的各个果实,实现夜间荔枝果实的有效识别。



图 7 Hough 圆拟合结果
Fig. 7 Results of Hough circle fitting

2 结果与讨论

2.1 荔枝果实的识别试验

本文设计了白天和夜间的荔枝图像识别试验,随机选择夜间 LED 光照与白天自然光照的图像各 150 幅。利用本文算法进行荔枝识别试验,试验结果如表 2 所示。

因为荔枝是成串生长的,果实之间会存在重叠

现象,因此荔枝果实图像的识别正确率不能根据荔枝果实的正确识别个数来计算。本研究计算荔枝图像中果实被准确识别的标准为:被识别的荔枝果实像素数占图像中所有荔枝果实像素数的百分比超过 90%。在表 2 中,夜间荔枝图像中有 143 幅荔枝果实的识别像素数百分比超过 90%,识别正确率为 95.3%;以同样的方法进行白天荔枝识别准确率的计算,白天 150 幅荔枝图像中总共有 109 幅准确识别的荔枝果实图像,识别正确率为 72.7%。

表 2 荔枝识别试验结果			
Tab. 2 Results of litchi recognition experiment			
光照情况	图像总数/幅	正确数/幅	正确率/%
白天	150	109	72.7
夜间	150	143	95.3

表 2 的试验结果表明:本文算法能有效判断夜间自然环境中荔枝的存在状态,指导采摘机器人进行正确有效的作业。使用同一算法在白天识别荔枝的效果没有夜间好,容易受周围环境的影响,具体原因有:①白天采集的图像中,地面的枯叶、背景中的近色物体颜色接近荔枝串,从而导致荔枝串与背景的分割误差。②顺光、逆光等不同的光照条件使荔枝串颜色改变,顺光有明显的白色光斑,逆光的果实呈黑色,均影响图像识别的准确性。在夜间环境下,周围环境的影响大大减小,被灯光照射的荔枝串与背景能明显区分,有效提高视觉识别的成功率。

夜间荔枝图像识别失败的主要原因有:①背景中如果有其它外侵光源,会影响荔枝图像的采集效果,造成识别误差,如图 8 所示。②目标与摄像机之间存在相对运动造成图像采集模糊,产生识别误差。而针对这些误差可以采取的改进措施有:保证夜间图像采集环境的光源单一性,以及后续研究中进行扰动目标的图像处理算法的优化。

2.2 算法性能分析

本文进行了算法性能分析,随机挑选 150 幅夜间图像,对本文算法和 FCM 算法进行性能分析,为对比 2 个算法分割的准确性,先对这 150 幅图像进行人工标记,计算荔枝像素数,再计算 2 种算法分割

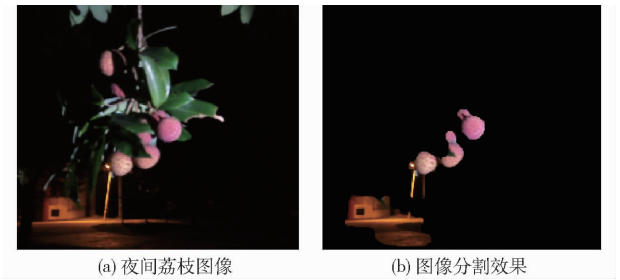


图 8 周围环境对夜间识别的影响
Fig. 8 Effect of environment on nighttime litchi recognition

后得到的荔枝像素数,并计算 2 种算法的运行时间,其中部分试验数据的统计结果如表 3 所示。经过对试验结果的分析,用直接模糊 C 均值聚类分割 150 幅

表 3 算法性能分析统计表

Tab.3 Statistics of algorithm performance analysis							
人工标记		FCM 算法			本文算法		
图像	果实	果实	面积	运行	果实	面积	运行
序号	面积/ 像素	面积/ 像素	偏差/ %	时间/ s	面积/ 像素	偏差/ %	时间/ s
1	33 562	28 556	14. 9	0. 57	31 580	5. 9	0. 48
2	37 457	33 697	10. 0	0. 56	35 967	4. 0	0. 42
3	26 785	21 764	18. 7	0. 59	26 158	2. 3	0. 45
4	23 856	25 864	7. 7	0. 55	22 987	3. 6	0. 44
5	31 758	25 896	18. 5	0. 56	30 769	3. 1	0. 46

注:面积偏差 = |算法分割果实面积 - 人工标记果实面积| / 人工标记果实面积 × 100%。果实面积指荔枝像素数的总和。

夜间荔枝图像,平均面积偏差为 13. 6% ,平均分割单幅图像运行时间为 0. 57 s。用本文算法分割平均面积偏差为 4. 7% ,平均分割单幅图像运行时间为 0. 46 s。

3 结论

(1)通过分析白天自然光和夜间 LED 灯光 2 种光照条件下采集的荔枝图像,确定了夜间荔枝识别的可行性,选取了 YIQ 颜色模型进行夜间荔枝识别,利用 Otsu 与 FCM 算法相结合的方法实现夜间荔枝果实的识别;设计了夜间荔枝的识别试验,结果表明识别的正确率为 95. 3% 。

(2)对本文算法进行了性能分析,试验结果表明该算法对夜间荔枝的识别有较好的实时性,夜间荔枝图像识别的平均时间为 0. 46 s。

参 考 文 献

1 BAC C W, HEMMING J, HENTEN E J V. Stem localization of sweet-pepper plants using the support wire as a visual cue[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 10: 111 – 120.

2 项荣, 应义斌, 蒋焕煜. 田间环境下果蔬采摘快速识别与定位方法研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 208 – 223. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131137&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.037.

XIANG Rong, YING Yibin, JIANG Huanyu. Development of real-time recognition and localization methods for fruits and vegetables in field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 208 – 223. (in Chinese)

3 BERENSTEIN R, SHAHAR O B, SHAPIRO A, et al. Grape clusters and foliage detection algorithms for autonomous selective vineyard sprayer[J]. Intelligent Service Robotics, 2010, 3(4): 233 – 243.

4 熊俊涛, 邹湘军, 刘念, 等. 基于机器视觉的荔枝果实采摘时品质检测技术[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 54 – 60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140709&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.009.

XIONG Juntao, ZOU Xiangjun, LIU Nian, et al. Fruit quality detection based on machine vision technology when picking litchi[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 54 – 60. (in Chinese)

5 BULANON D M, KATAOKA T. Fruit detection system and an end effector for robotic harvesting of Fuji apples[J]. Agricultural Engineering International: the CIGR Journal, 2010, 12(1): 203 – 210.

6 井利民, 何东健, 张建锋. 基于 ARM 的苹果果实图像识别与定位技术研究[J]. 微计算机信息, 2009, 25(20): 87 – 89.

JING Limin, HE Dongjian, ZHANG Jianfeng. Research on technologies of apple fruit image recognition and location based on ARM[J]. Microcomputer Information, 2009, 25(20): 87 – 89. (in Chinese)

7 JIANG Huanyu, PENG Yongshi, YING Yibin. Measurement of 3-D locations of ripe tomato by binocular stereo vision for tomato harvesting[C]//2008 ASABE International Meeting, ASABE Paper 084880, 2008.

8 YUAN Ting, LI Wei, FENG Qingchun, et al. Spectral imaging for greenhouse cucumber fruit detection based on binocular stereovision[C]//2010 ASABE International Meeting, ASABE Paper 1009345, 2010.

9 纪超, 冯青春, 袁挺, 等. 温室黄瓜采摘机器人系统研制及性能分析[J]. 机器人, 2011(6): 726 – 730.

JI Chao, FENG Qingchun, YUAN Ting, et al. Development and performance analysis on cucumber harvesting robot system in greenhouse[J]. Robot, 2011(6): 726 – 730. (in Chinese)

10 赵德安, 刘晓洋, 陈玉, 等. 苹果采摘机器人夜间识别方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 15 – 22. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150303&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.003.

ZHAO Dean, LIU Xiaoyang, CHEN Yu, et al. Image recognition at night for apple picking robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 15 – 22. (in Chinese)

11 项荣, 段鹏飞. 番茄采摘机器人夜间照明系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 8 – 14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160702&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.002.

- XIANG Rong, DUAN Pengfei. Design and experiment of night lighting system for tomato picking robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 8 – 14. (in Chinese)
- 12 LIU Xiangyang, ZHAO Dean, JIA Weikang, et al. A method of segmenting apples at night based on color and position information[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 112: 118 – 123.
- 13 FU Longsheng, WANG Bin, CUI Yongjie, et al. Kiwifruit recognition at nighttime using artificial lighting based on machine vision[J]. International Agriculture and Biological Engineering, 2015(4): 52 – 59.
- 14 熊俊涛, 邹湘军, 陈丽娟, 等. 荔枝采摘机械手果实识别与定位技术[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2012, 33(1): 1 – 5.
- XIONG Juntao, ZOU Xiangjun, CHEN Lijuan, et al. Fruit recognition and positioning technology of litchi picking manipulator[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2012, 33(1): 1 – 5. (in Chinese)
- 15 郭艾侠, 邹湘军, 朱梦思, 等. 基于探索性分析的荔枝果及结果母枝颜色特征分析与识别[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 191 – 198.
- GUO Aixia, ZOU Xiangjun, ZHU Mengsi, et al. Color feature analysis and recognition for litchi fruits and their main fruit bearing branch based on exploratory analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(4): 191 – 198. (in Chinese)
- 16 熊俊涛, 邹湘军, 王红军, 等. 基于 Retinex 图像增强的不同光照条件下的成熟荔枝识别[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 170 – 178.
- XIONG Juntao, ZOU Xiangjun, WANG Hongjun, et al. Recognition of ripe litchi in different illumination conditions based on Retinex image enhancement[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 170 – 178. (in Chinese)
- 17 彭红星, 邹湘军, 陈丽娟, 等. 基于双次 Otsu 算法的野外荔枝多类色彩目标快速识别[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 61 – 68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140410&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.010.
- PENG Hongxing, ZOU Xiangjun, CHEN Lijuan, et al. Fast recognition of multiple color targets of litchi image in field environment based on double Otsu algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 61 – 68. (in Chinese)
- 18 OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1979, 9(1): 62 – 66.
- 19 GALAMBOS C, KITTLER J, MATAS J. Gradient-based progressive probabilistic Hough transform[J]. IEEE Vision Image and Signal Processing, 2002, 148(3): 158 – 165.
- 20 黄永林, 叶玉堂, 陈镇龙, 等. 一种新的快速 Hough 变换圆检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(9): 837 – 841.
- HUANG Yonglin, YE Yutang, CHEN Zhenlong, et al. New method of fast Hough transform for circle detection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(9): 837 – 841. (in Chinese)