

基于机器视觉的采后荔枝表皮微损伤实时检测

孙宝霞¹ 汤林越² 何志良² 邹湘军³ 熊俊涛²

(1. 广东工程职业技术学院, 广州 510520; 2. 华南农业大学数学与信息学院, 广州 510640;

3. 华南农业大学工程学院, 广州 510640)

摘要: 利用机器视觉技术进行采后荔枝的品质检测与分级有重要意义。首先结合摄像机与荧光光谱仪进行了荔枝图像的光谱分析, 荧光作为激发光进行荔枝果皮的发射光谱特性分析, 确定了不同荧光照射荔枝果实表皮的视觉检测方法的可行性; 然后设计了具有不同颜色光照转换控制功能的机器视觉系统, 选定了红色、蓝色和绿色荧光灯, 对正常和微损伤两种品质状态的荔枝果实荧光图像进行灰度直方图统计分析, 确定了利用蓝色荧光作为照射光源以及 HSV 颜色空间的 V 分量进行微损伤荔枝果实图像识别的方法, 利用探索性分析法对荔枝果实视觉检测试验结果进行统计与分析, 确定了正常与微损伤荔枝果实图像分割的灰度图阈值范围, 结合优化的圆拟合算法, 实现了荔枝果实视觉智能分级系统的设计。试验结果表明: 该研究方法对正常荔枝和表皮微损伤荔枝的识别正确率为 92%, 为荔枝产后智能化检测分级提供了技术支持。

关键词: 荔枝; 损伤; 光谱分析; 机器视觉; 信息融合

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0035-07

Real-time Detection of Micro-damage on Peel of Postharvest Litchi Based on Machine Vision

Sun Baoxia¹ Tang Linyue² He Zhiliang² Zou Xiangjun³ Xiong Juntao²

(1. *Guangdong Engineering Polytechnic, Guangzhou 510520, China*

2. *College of Mathematics and Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China*

3. *College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China*)

Abstract: It has great significance that using the machine vision technology to detect the quality of postharvest litchi fruit. Firstly, the camera and fluorescence spectrometer were used for the spectrum analysis of litchi image, the emission spectrum characteristics were analyzed under the fluorescence as excitation light, which determines the feasibility of the visual detection method of litchi fruits with different fluorescence exposures. Then, the machine vision system of different light switch controls were designed, the red, blue and green fluorescent lamp were selected, and the single-chip microcomputer system was used to control the switch of the LED lamps, of which the interval is 1s; meanwhile, the image acquisition system triggered the camera to take images, the frequency of the light switch in keeping with the number of taking image times. The grey level histogram of the fluorescence image for normal and micro-damaged state of two kinds of litchi fruit was statistic analyzed, the image recognition method for the micro damaged litchi fruit was determined by using blue fluorescent as light source and the V component of HSV color space. Then the exploratory analysis was used for the statistics and analysis on test results of litchi fruit visual inspection. The gray-scale image segmentation threshold of the normal and micro-damaged litchi fruit was determined. The gray-scale image threshold segmentation, the morphology

收稿日期: 2016-05-30 修回日期: 2016-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31201135)和广东省科技计划项目(2015A020209023、2015A020209013)

作者简介: 孙宝霞(1981—),女,讲师,博士,主要从事农业信息自动化研究,E-mail: sunbaoxia@126.com

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

processing and the optimized Hough circle fitting method were used to the litchi images, which realized the design of the machine vision intelligent classification system for litchi fruit. The test results show that: the recognition accuracy of the normal and micro-damaged litchi fruit is 92%, which can provide technical support to intelligent detection technology for postharvest fruit and vegetable.

Key words: litchi; damage; spectral analysis; machine vision; information fusion

引言

利用信息化手段进行果蔬产后的检测与分级,能有效提升农产品的附加值,降低果蔬业产后的劳动成本,对农产品生产和农业经济的发展有着重要的意义^[1]。

国外对果蔬产后分级的主要研究有:SHIN 等^[2]研究了基于视觉图像的采后柑橘质量和大小估算方法,进行柑橘的筛选分级;KHOSHROO 等^[3]从机器视觉采集的图像中提取石榴的面积、高宽比、圆度和曲率,设定筛选参数进行石榴的形状分类,建立了石榴自动化分级系统;NOZARI 等^[4]将水果的果重、长度、宽度和厚度作为测量参数,对 1 000 个水果进行分级,模糊系统分级率可达 93.5%;SAEED 等^[5]进行油棕鲜果的分类,利用近红外技术进行油棕鲜果新鲜程度判断,实现了油棕鲜果的准确分类。以上研究采用的主要信息手段为机器视觉技术及近红外反射光谱图像技术,实现了果蔬及农产品采后品质的检测与分级。近年来国内也发展了一些果蔬及农产品品质的视觉检测与分级研究,研究主要集中在利用视觉技术对果蔬采后的无损检测和病虫害监测^[6-10]。这些研究为农产品品质检测和产后分级提供了技术手段。

综上所述,当前国内外针对南方特色水果荔枝、龙眼等的品质检测与分级的相关研究较少。已有研究利用计算机视觉进行荔枝检测与分级,主要基于荔枝果实横径测量方法分级桂味和糯米糍两种荔枝,并利用荔枝最大横径处面积估测荔枝果重,实现荔枝果实大小和果重分级^[11],但因荔枝品种以及个体存在差异,研究手段有一定局限性;本研究团队前期进行了自然环境下成熟荔枝的识别研究,利用彩色摄像机获取自然环境下生长期的荔枝果实图像进行颜色特征分析,取得了一定成果^[12-13],但该研究主要基于生长期荔枝果实的自然环境状态,并未涉及采后荔枝果实的品质检测分级等研究。

本文研究采后荔枝的品质检测与分级技术。从光谱信息技术角度分析,结合生物计量学方法,进行荔枝采后品质检测视觉系统的设计,搭建不同颜色荧光照射的机器视觉检测系统,针对荔枝果实的成

熟和微损伤两种状态进行荧光图像采集,然后进行图像数据分析,确定荔枝果实不同状态的图像分割阈值,结合改进的圆拟合方法,最终建立不同品质荔枝果实的视觉检测与分级系统。

1 荔枝的生物特性及颜色分析

1.1 材料与仪器

研究材料为广东省种植的荔枝品种怀枝,其成熟期在 6 月底至 7 月中旬,正常成熟和表皮微损伤的荔枝如图 1 所示。设计了荔枝的生物特性试验和荔枝不同品质状态的光谱分析试验,其中试验所用仪器如图 2 所示。

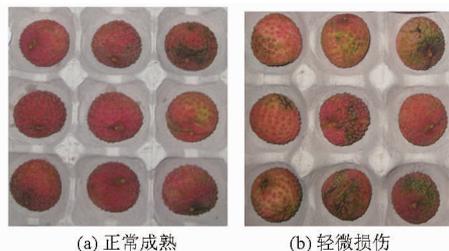


图 1 荔枝果实的不同品质状态

Fig. 1 Different quality states of litchi fruit

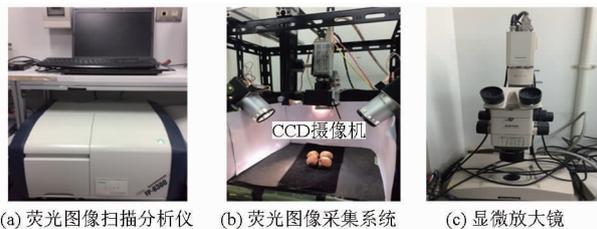


图 2 试验分析用仪器

Fig. 2 Instruments of test analysis

为搭建荔枝果实品质的视觉检测系统,设计了视觉系统硬件,其结构示意图如图 3 所示。荔枝果实品质的视觉检测系统包括 CCD 摄像机(维视公司 MV-VDM200SM/SC 型,最大分辨率 2 048 像素 × 1 536 像素,Computer 工业镜头,其视场角 43.60°)、C51 单片机控制模块(STC89C52RC)、继电器模块(LREL_4H)、DC12V 电源适配器、刚性材料角铁(3 cm × 5 cm × 2 mm)和无反光纸等材料。其实物如图 4 所示,由单片机和电路板设计了控制系统,该系统控制各个 LED 灯进行相互切换,切换间隔为 1 s,同时图像采集系统触发摄像机进行图像拍摄,光照切换与拍摄次数一致。

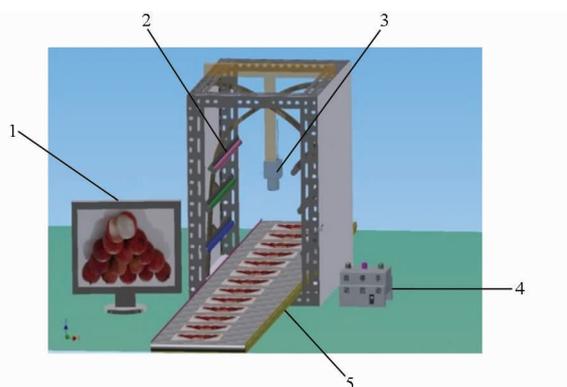


图 3 荔枝果实品质自动分级系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of automatic grading system for quality of litchi fruit

1. 显示器 2. LED 灯 3. 摄像头 4. 灯光控制器 5. 流水线

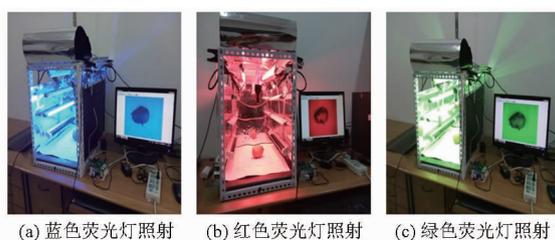


图 4 不同灯光转换控制的视觉系统

Fig. 4 Visual systems controlled by different lights

1.2 试验设计与结果讨论

进行了荔枝生物特性试验和荔枝不同品质状态的光谱分析试验,其过程和结果分析如下:

1.2.1 荔枝的生物特性分析

根据荔枝的生物特性,怀枝果实从挂果开始至成熟时期,其果实表面颜色会随着成熟程度变化,由绿色逐渐转红;而采后荔枝的表皮颜色会随着时间变化逐渐由红色变为褐色,这是表皮氧化所致,其中变褐色速度为:损伤最快、正常其次、未成熟最慢。当荔枝表皮存在损伤后,其氧化速度会变快,损伤大小与氧化速度成正比。荔枝损伤分为明显的表皮损伤和表皮微损伤,其中微损伤荔枝果实在外观上表现不明显,利用肉眼观察有难度,非常容易与正常果实混淆。因此,本研究通过显微放大镜选取表皮存在轻微裂痕、擦伤、带褐斑以及表皮有细小虫孔的荔枝果实,置于正常温度下观察其氧化及颜色变化情况。同时利用压力测试台进行机械挤压造成荔枝轻微损伤,然后用显微放大镜鉴定其损伤程度,选择作为样本的荔枝果实,进行视觉检测。图 1 为自然环境中成熟正常和微损伤的荔枝果实图像。

利用压力台进行荔枝挤压损伤的试验过程为:采用广州广材试验仪器有限公司的 WD-20KE 型精密微控电子万能试验机,精度 $\pm 0.5\%$,分辨率 $\pm 1/120\,000$ 。果实压缩试验采用刚性平板压缩方式,随着加载力的增大,荔枝果壳发生破裂,该点也

被称为破裂点。分析破裂点的压力值和变形量,根据荔枝本身的直径,计算破裂点的压缩率,作为进行荔枝机械损伤试验的参考指标,利用试验确定压缩率 16% 时为产生微损伤的挤压参数^[14]。

1.2.2 荔枝不同品质状态的光谱分析

从光学角度来分析荔枝果实的颜色特征,采用光谱分析法,确定荔枝果实颜色所在的光谱波段,从而指导视觉系统进行图像识别算法的设计。

试验选取 CCD 摄像机、FP-8300 型荧光光谱分析仪(日本 JASCO)进行荧光照射下荔枝的光谱特性分析,如图 2a 所示。其中 FP-8300 型荧光光谱仪的激发波长为 200~750 nm,发射波长为 200~700 nm。试验过程为:选取成熟荔枝果实的果皮,利用荧光光谱仪进行样本荧光光谱检测,在荧光光谱仪中获得荔枝果皮的荧光特性三维数据,选取三维数据中各个波峰值对应的激发波长下荔枝荧光的发射波长数据,在 Excel 中进行数据曲线拟合,如图 5a 所示。图 5a 中,横坐标是光照的激发波长,纵坐标是目标被激发后发射荧光强度,峰值越高,其强度越大,不同颜色代表着同一激发波长下果皮中不同成分对应的发射波长(荧光强度)。由图 5a 得知,在激发波长为 455 nm 时,正常荔枝果实荧光图像发射波长最大,即其荧光发射强度最大,如图 5a 中的最高波峰。同样的方法对表皮微损伤后放置 2 h 的荔枝果皮进行荧光光谱特性分析,其结果如图 5b 所示,在激发波长为 611 nm 时微损伤荔枝果实表皮的荧光发射强度最大。该试验表明成熟与损伤两种状态荔枝果皮生物特性的差异体现为荧光激发下最强发射波长的差异。

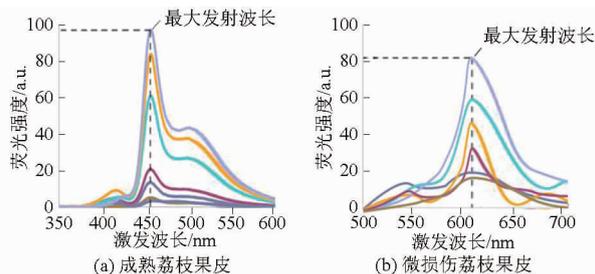


图 5 荔枝果实的光谱分析试验结果

Fig. 5 Spectrum analysis experiment result of litchi fruit

通过上述荔枝的光谱特征分析试验可知:不同品质状态荔枝果实的表皮在同一荧光激发波长下,会激发不同的发射波长,其荧光图像中呈现的荔枝果实图像存在较大差异;因此在图像处理中利用这种差异能有效辨识荔枝果实的不同状态。

1.3 荔枝颜色特征分析

根据光谱试验分析结果,不同颜色荧光照射荔枝果实能激发其不同的发射波长,据此,选取红色、

绿色、蓝色荧光灯,进行荔枝果实图像采集试验,然后基于探索性数据分析方法的思想,进行数据分析与统计,以实现不同品质荔枝果实的视觉识别。

选取日本东芝生产的红、绿、蓝3种荧光灯,其对应参数为:型号 FL20T8RE/18,电压 220 V,功率 20 W,灯管直径 25.5 mm,管长 588.7 mm,其中紫外荧光灯的发射峰值波长为 352 nm,其它不同颜色荧光灯主要利用涂覆在管壁上的荧光粉吸收紫外线发出任意颜色的荧光,本研究的红色荧光灯发射峰值波长为 611 nm,绿色荧光灯发射峰值波长为 541 nm,蓝色荧光灯发射峰值波长为 450 nm。基于不同颜色荧光灯进行荔枝不同状态的荧光图像试验,结果如图 6 所示,去除图像背景后同一表皮微损伤荔枝果实不同颜色荧光照射下其灰度直方图分布区别明显。

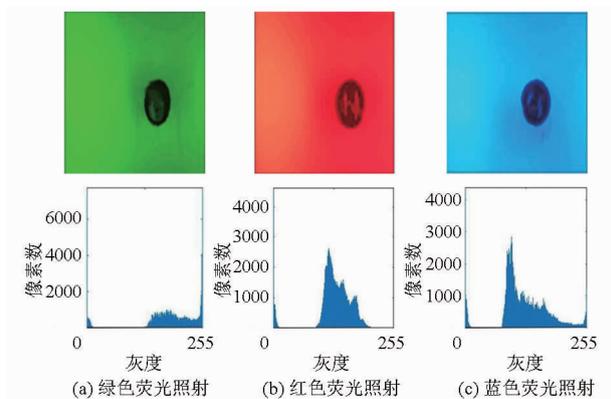


图 6 不同荧光灯照射荔枝果实图像与直方图

Fig. 6 Litchi fruit images and histograms under different fluorescence lights

为进一步探究不同颜色荧光灯照射下荔枝图像的差异,分别选取正常成熟和表皮微损伤两种荔枝果实各 30 个,在红色、绿色、蓝色荧光灯照射下获取图像,然后分析各幅图像的灰度区间分布情况,计算分布区间的平均值,统计结果如图 7 所示。绿色荧光灯照射下,成熟荔枝图像和微损伤荔枝图像的灰度分别在 $[20, 80]$ 和 $[30, 105]$ 区间,二者之间有较大重叠;而蓝色荧光灯照射下,微损伤荔枝图像的灰度分布区域 $[18, 88]$ 相对成熟荔枝图像的灰度分布区域 $[95, 178]$ 存在明显差异,并且两个灰度分布区域无重叠。而红色荧光灯照射下,荔枝果实两种状态图像的灰度分布也存在重叠,如图 7c 所示。

同时进行了正常和微损伤荔枝果实图像识别的颜色空间选择。首先拍摄 3 种荧光灯(红、蓝、绿)照射下的荔枝图像(微损伤 24 幅、正常 26 幅),在 RGB、YCrCb、HSV、Lab、YUV、YIQ、HSI 等颜色空间下分析其直方图灰度级分布特征,经过多次取样平均和差分对比发现:在蓝、绿色荧光灯照射下,正常

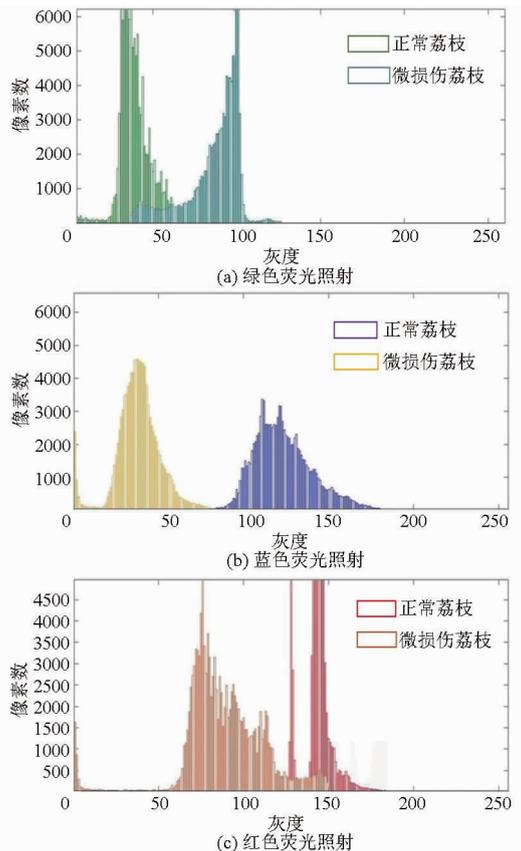


图 7 3 种荧光照射下正常荔枝和微损伤荔枝灰度分布区域统计

Fig. 7 Gray value distribution statistics of normal and micro-damaged litchi under three kinds of fluorescent light

和微损伤的荔枝果实图像数据差异明显;同时分析荔枝图像在各个颜色空间的特征,发现绿色荧光下 RGB 颜色空间的 G 分量和蓝色荧光下 HSV 的 V 分量对应的正常与微损伤荔枝图像数据分布存在差异,结果如图 8 所示。绿色荧光灯照射下,正常荔枝和微损伤荔枝图像的 G 分量分布值有明显重叠,正常荔枝图像的 G 分量灰度在 $[20, 90]$,而微损伤荔枝图像的 G 分量灰度在 $[12, 99]$ 。在蓝色荧光灯照射下,正常荔枝图像的 V 分量灰度为 $[80, 170]$,而微损伤荔枝图像的 V 分量灰度为 $[30, 90]$ 。

对蓝色荧光灯照射下的正常和微损伤荔枝图像进一步分析,蓝色荧光灯照射下正常和微损伤的荔枝果实图像以及对应的 V 分量灰度直方图如图 9 所示。在图 9c、图 9f 中,正常荔枝图像与微损伤荔枝图像的灰度直方图分布区间差异明显。基于以上试验分析结果,选取蓝色荧光图像的 V 分量灰度图进行正常与微损伤荔枝果实的视觉识别。

2 荔枝果实品质的图像识别技术

在设计视觉检测系统中,进行不同品质荔枝图像采集,然后进行图像处理。首先对荔枝图像进行灰度图的阈值分割,然后进行形态学处理,最后进

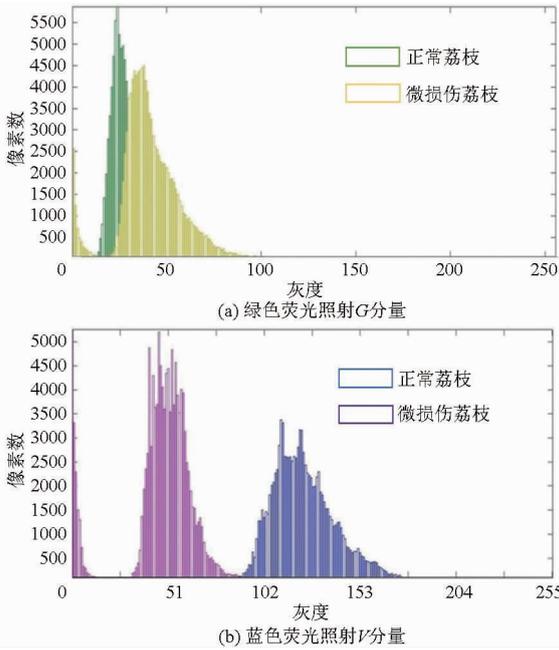


图 8 不同状态荔枝图像在两种荧光照射下的颜色分量

Fig. 8 Color component of litchi images in different states under two kinds of fluorescent light

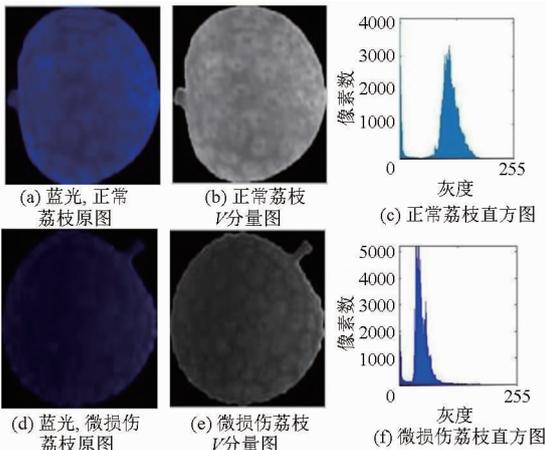


图 9 荔枝果实 HSV 颜色空间的 V 分量图

Fig. 9 V component of litchi fruit in HSV color space

行 Hough 圆拟合,其中 Hough 圆拟合的优化参考文献[15]实现。具体思路为:在 Hough 变换圆检测中,3 个参量空间的最大值分别为 $r_0 = r_{max} - r_{min}$ 、 $y_0 = h$ 、 $x_0 = w$ 。式中 r_{max} 、 r_{min} 分别为图像中所有圆中最大半径和最小半径的估值, r_0 为圆半径估值范围。

优化 Hough 变换圆检测速度时,应减小 r_{max} 、 r_{min} 和 r_0 参量空间值,根据目标区域的具体情况设置半径和圆心位置的搜索范围。研究前期对本视觉系统进行了标定,采用经典的四步标定法确定了摄像机镜头焦距 f ,以及摄像机的有效拍摄深度距离范围 321 ~ 886 mm,通过统计试验确定成熟荔枝的直径平均值,得到荔枝品质的 Hough 变换圆检测半径的搜索范围 r_{min} 、 r_{max} 和圆心距离为

$$r_{min} = \min \{ a_i, b_i \} / 0.43 \quad (1)$$

$$r_{max} = \max \{ a_i, b_i \} / 0.71 \quad (2)$$

$$L = \min \{ a_i, b_i \} / 2 \quad (3)$$

其中, a_i 和 b_i 分别为图像中荔枝外接矩形的长和宽(单位为像素),0.43、0.71 和 2 是由试验统计得出的结果。

荔枝品质的视觉分级过程如下:

(1) 在蓝色荧光下获取荔枝果实图像,将图像转换到 HSV 空间的 V 分量,采用微损伤荔枝灰度区间阈值 [30, 80] 进行分割,这里选择的阈值区域 [30, 80] 比 [30, 90] 能确保分割的准确性,从而得到正常荔枝与较完整的微损伤荔枝图像。

(2) 采用形态学滤波的方法,去除残留的噪声,得到较完整的微损伤荔枝图像区域的二值图像。

(3) 对图像进行二次膨胀及腐蚀操作,复原得到较完整的彩色荔枝图像。

(4) 利用 Hough 圆检测找出微损伤荔枝类圆形区域的圆心和半径,然后在原图中标识出来,即识别出微损伤荔枝。

图像处理效果如图 10 所示。

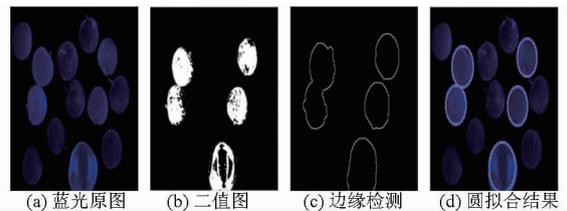


图 10 蓝色荧光下荔枝果实分级检测的识别过程图

Fig. 10 Identification process of grading test of litchi fruit under blue fluorescent

荔枝果实品质的分级流程如图 11 所示,其中本算法进行不同品质荔枝果实的图像识别运算平均时间为 0.82 s。

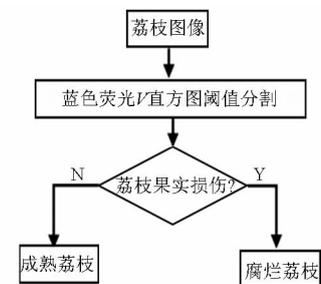


图 11 荔枝果实品质视觉分级流程图

Fig. 11 Flow chart of visual grading in litchi fruit quality

3 试验与分析

进行了荔枝果实品质的视觉检测试验。对随机混合不同状态的荔枝果实进行图像采集,获得 100 幅荔枝样本图像,其中正常成熟荔枝图像 47 幅,表皮

微损伤荔枝图像 53 幅;利用本研究图像处理算法进行荔枝果实品质分级检测,试验结果中有 92 幅荔枝果实的状态被准确判断,即能准确分辨出该荔枝果实是正常成熟或者表皮微损伤状态,辨识果实品质的准确率为 92%。试验结果统计如表 1 所示。

表 1 荔枝品质识别试验结果统计

Tab.1 Results statistics of experiment identificaiton for litchi fruit quality

果实类型	识别结果/次	正确结果/次	正确率/%
正常成熟荔枝	47	44	93.61
微损伤荔枝	53	48	90.57
总计	100	92	92

基于以上试验数据分析结果进行分析,其中造成识别误差的主要因素有:①荔枝果实生长期成熟早晚不同,果实表皮颜色存在差异,试验中采集图像时会有某些成熟过度的荔枝表皮颜色较暗,造成图像中信息不明显,产生识别误差。②微损伤荔枝果实表面有异物,掩盖了果实的实际信息,例如微损伤部位被遮盖,使得荔枝关键特征在图像中不显现,致使图像识别错误。

针对以上产生误差的因素,提出改进思路:①针对荔枝颜色表皮较暗的情况,可以考虑改进视觉系

统硬件,改进光源照射强度或增加其它光源进行组合,从而有效改善图像质量,凸显图像中颜色较暗的荔枝果实表皮信息,有效减少视觉识别误差。②损伤荔枝被异物遮盖的情况,需要从果实的颜色信息进一步分析,找到识别特征;或者选取合适的光学传感器,进行荔枝果实的颜色特征分析,找出识别规律。

4 结论

(1)根据荔枝的生长特性,利用光谱学方法分析在荧光灯照射下荔枝不同状态果实颜色呈现的发射光波长,确定了不同荧光照射荔枝果实的视觉分级方法的可行性。

(2)通过设计 LED 荧光灯交替控制转换系统,获取不同颜色荧光灯照射下的果实图像,分析果实蓝色、绿色和红色荧光图像,确定了蓝色荧光图像的 V 分量可进行正常和微损伤荔枝果实的识别。

(3)通过灰度图阈值分割结合 Hough 圆拟合方法,实现了荔枝果实不同状态的视觉检测与分级。试验结果表明:本研究方法检测荔枝果实品质的正确率为 92%。

参 考 文 献

- 1 SATORU Sakai, MICHIHISA Iida, KOICHI Osuka, et al. Design and control of a heavy material handling manipulator for agricultural robots[J]. *Autonomous Robots*, 2008, 25(3): 189 - 204.
- 2 SHIN J S, LEE W S, EHSANI R. Postharvest citrus mass and size estimation using a logistic classification model and watershed algorithm[J]. *Biosystem Engineering*, 2012, 113(1): 42 - 53.
- 3 KHOSHROO A, KEYHANI A, RAFIEE S H. Pomegranate quality evaluation using machin vision[J]. *Acta Horticulturae*, 2009, 818: 347 - 351.
- 4 NOZARI V, MAZLOMZADEH M. Date fruits grading based on some physical properties[J]. *Journal of Agricultural Technology*, 2013, 9(7): 1703 - 1713.
- 5 SAEED O M B, SANKARAN S, SHARIFF A R M. Classification of oil palm fresh fruit bunches based on their maturity using portable four-band sensor system[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 85: 55 - 60.
- 6 冯娟,曾立华,刘刚,等.融合多源图像信息的果实识别方法[J].*农业机械学报*, 2014, 45(2): 73 - 80.
FENG Juan, ZENG Lihua, LIU Gang, et al. Fruit recognition algorithm based on multi-source images fusion[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(2): 73 - 80. (in Chinese)
- 7 毛罕平,李明喜.基于多源机器视觉信息融合的番茄目标匹配[J].*农业工程学报*, 2009, 25(10): 142 - 147.
MAO Hanping, LI Mingxi. Tomato target matching based on multi-sensors machine vision information fusion[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(10): 142 - 147. (in Chinese)
- 8 柴玉华,侯升飞,彭长禄,等.基于高光谱图像技术的大豆分级识别方法研究[J].*东北农业大学学报*, 2014, 45(4): 107 - 112.
CHAI Yuhua, HOU Shengfei, PENG Changlu, et al. Identification of different soybean grade based on hyperspectral imagery[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2014, 45(4): 107 - 112. (in Chinese)
- 9 李小昱,陶海龙,高海龙,等.马铃薯缺陷透射和反射机器视觉检测方法分析[J].*农业机械学报*, 2014, 45(5): 191 - 196.
LI Xiaoyu, TAO Hailong, GAO Hailong, et al. Comparison of transmission and reflection imaging technologies to detect potato defects based on machine vision technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(5): 191 - 196. (in Chinese)
- 10 黄文倩,陈立平,李江波,等.基于高光谱成像的苹果轻微损伤检测有效波长选取[J].*农业工程学报*, 2013, 29(1): 272 - 277.
HUANG Wenqian, CHEN Liping, LI Jiangbo, et al. Effective wavelengths determination for detection of slight bruises on apples

- based on hyperspectral imaging[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 272-277. (in Chinese)
- 11 刘敏娟,洪添胜,李震,等. 基于计算机视觉的荔枝检测与分级方法[C]//中国农业工程学会 2009 年学术年会论文集, 2009:995-998.
LIU Minjuan, HONG Tiansheng, LI Zhen, et al. Inspection and classification of litchi based on computer vision[C]//CSAE 2009, 2009: 995-998. (in Chinese)
- 12 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)
- 13 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)
- 14 陈燕,蔡伟亮,邹湘军,等. 荔枝的力学特性测试及其有限元分析[J]. 农业工程学报,2011,27(12):358-363.
CHEN Yan, CAI Weiliang, ZOU Xiangjun, et al. Mechanical properties test and finite element analysis for litchi[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(12):358-363. (in Chinese)
- 15 熊俊涛,邹湘军,彭红星,等. 扰动柑橘采摘的实时识别与采摘点确定技术[J]. 农业机械学报,2014,45(8):38-43.
XIONG Juntao, ZOU Xiangjun, PENG Hongxing, et al. Real-time identification and picking point localization of disturbance citrus picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 38-43. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 34 页)

- 16 杨勇,郑崇勋,林盘,等. 基于改进的模糊 C 均值聚类图像分割新算法[J]. 光电子·激光,2005,16(9): 1118-1122.  
YANG Yong, ZHENG Chongxun, LIN Pan, et al. A new algorithm for image segmentation based on modified fuzzy C-means clustering[J]. Journal of Optoelectronics·Laser,2005,16(9): 1118-1122. (in Chinese)
- 17 程全,马军勇. 基于纹理和梯度特征的多尺度图像融合方法[J]. 清华大学学报:自然科学版,2014,54(7): 935-941.  
CHENG Quan, MA Junyong. Multi-scale image fusion method based on the characteristics of texture and gradient[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology,2014,54(7): 935-941. (in Chinese)
- 18 ANTONIO R M, JOSÉ I R. Application of gradient-based edge detectors to determine vanishing points in monoscopic images: comparative study[J]. Image and Vision Computing,2015,43: 1-15.
- 19 李春月,李峰,曹鹏,等. 基于分水岭变换和 FCM 的图像分割[J]. 计算机工程与科学,2009,31(12): 56-64.  
LI Chunyue, LI Feng, CAO Peng, et al. Image segmentation based on watershed transform and FCM[J]. Computer Engineering & Science,2009,31(12): 56-64. (in Chinese)
- 20 李江波,彭彦昆,黄文倩,等. 桃子表面缺陷分水岭分割方法研究[J]. 农业机械学报,2014,45(8): 288-293.  
LI Jiangbo, PENG Yankun, HUANG Wenqian, et al. Watershed segmentation method for segmenting defects on peach fruit surface [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(8): 288-293. (in Chinese)
- 21 GUO Yingying, WANG Xinjie, ZHAI Yusheng, et al. A novel method for identification of cotton contaminants based on machine vision[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics,2014,125(6): 1707-1710.
- 22 CHOWDHURY A S, TAN S, YAO J, et al. Colonic fold detection from computed tomographic colonography images using diffusion-FCM and level sets[J]. Pattern Recognition Letters,2010,31(9): 876-883.