

# 苹果采摘机器人夜间识别方法\*

赵德安 刘晓洋 陈玉姬 伟 贾伟宽 胡婵莉

(江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 提出了一种适用于苹果采摘机器人夜间识别的方法。在图像采集阶段,通过对比不同光源的照明效果,选用白炽灯作为照明光源并采用2盏白炽灯从不同角度照明的方式削弱图像中的阴影。在图像分割阶段,对比白天图像的分割方法,提出改进 $R-G$ 色差分割法。此外针对夜间图像中的高亮反光区,采用二次分割的方法提取出水果表面的高亮反光区以此对分割后的图像进行修补,以得到完整的分割结果。经统计不考虑果实的遮挡和粘连,夜间苹果正确识别率达到83.7%。

**关键词:** 苹果 采摘 夜间 图像识别

**中图分类号:** TP274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0015-08

## Image Recognition at Night for Apple Picking Robot

Zhao Dean Liu Xiaoyang Chen Yu Ji Wei Jia Weikuan Hu Chanli

(School of Electronic and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** The paper presents a method of image recognition for apple picking robot at night. In the stage of image acquisition, comparing different lighting effects of light source, the proposed method selected the incandescent lamp as artificial lighting. And two lamps were placed in different sites to weaken shadow with  $60^\circ$  angle. In the stage of image segmentation, comparing the image recognition methods adopted in daytime, the improved  $R-G$  image recognition method was proposed. Referring to reflective areas in the surface of apples, twice segmentation method was proposed to separate reflective areas from images to repair segmented images above. The first segmentation aimed to determine the areas in where apples were located. The second segmentation aimed to determine the reflective areas in the determined areas of first segmentation. Taking no account of sheltered and adhesive apples, the rate of identification on the basis of the statistic of 60 images acquired at night can reach to 83.7%. This paper verified the ability of image recognition for apple picking robot at night and discussed the feasibility of apple picking at night.

**Key words:** Apple Picking Night Image recognition

### 引言

我国是一个水果生产大国<sup>[1]</sup>。用于水果采摘的劳动力占整个生产过程所用劳动力的1/3以上<sup>[2-5]</sup>。采用机器人进行机械化采摘不仅可以降低人工成本,减少损伤率,还能提高采摘效率<sup>[6-10]</sup>。为了在水果成熟期内,尽快完成密集的采摘工作,水果采摘机器人不但需要白天能正常工作,而且需要

具有夜间工作的能力。虽然国内外对水果采摘的图像识别进行了大量研究<sup>[10-18]</sup>,但是对于夜间的水果识别涉及较少。Font等<sup>[19]</sup>在夜间利用人工光源照明采集了葡萄园中成熟葡萄的RGB图像,通过检测葡萄表面的球面反射峰值计算葡萄个数。Payne等<sup>[20]</sup>在夜间人工光源下采集了接近成熟硬化阶段的芒果图像,结合YCbCr彩色空间的颜色特征与形状纹理特征计算芒果个数并以此估算芒果产量。虽

收稿日期: 2014-11-10 修回日期: 2014-12-23

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA10Z254)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20133227110024)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 赵德安,教授,博士生导师,主要从事机器人控制技术研究,E-mail: zhaodean228@126.com

然都做了夜间水果识别的研究,但是目的并不是为机器人采摘服务,也没有进行精确识别。然而机器采摘需要保证识别结果的完整并准确定位水果的位置。本文以此为目标对夜间水果图像进行识别。

## 1 图像采集与分析

图像采集是夜间图像识别的重要步骤,图像采集方式直接影响夜间图像的品质和后续图像处理的方式和方法。实验以红富士苹果为处理对象并在徐州市丰县大沙河镇苹果园进行了图像采集。为防止

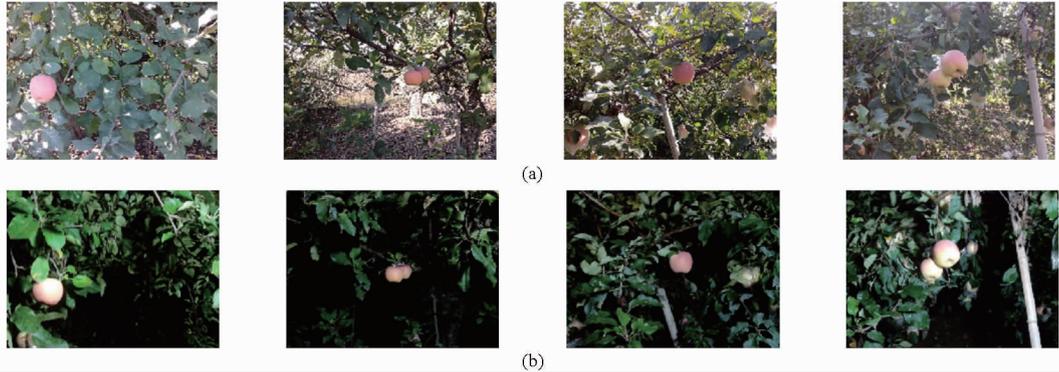


图1 白天夜间图像对比

Fig.1 Comparison of pictures at daytime and night

(a) 白天图像 (b) 夜间白色LED灯光下的图像

对比图1a、1b,可以初步得出2点结论:夜间图像背景存在大量暗区,枝叶不清晰,背景简单;夜间图像目标主体果实色彩鲜明,但是某些图像存在高亮反光区,而且有阴影。夜间图像的第1个特征对于图像分割是非常有利的,大大降低了分割的难度。特征2中果实颜色鲜明,说明色彩饱和度较高,可以采用以颜色为基础的方法对图像进行识别。然而苹果表面角质层反光形成的反光区与苹果自身或枝叶遮挡造成的阴影,使图像的色彩信息缺失,形状边缘信息模糊。

### 1.1 阴影处理

阴影区域的亮度较暗, $R$ 、 $G$ 、 $B$ 分量间差异较小甚至没有。因此以颜色信息为基础对图像阴影区域进行识别较难,而从形状或者位置等信息识别阴影区域的算法也较为复杂。

阴影的形成主要是由于光照不均和枝叶在水果表面的投影,可以从人工光源入手,在图像采集阶段就消除阴影或者削弱阴影,尽可能保留原有的色彩信息。受手术台无影灯的启发,实验采用多点照明的方式削弱消除阴影。采用了2盏LED灯在距离目标2m处呈 $60^\circ$ 夹角对目标进行照明。不同方向的灯光可以相互抵消或削弱一盏灯光产生的阴影,使图像的信息更加完整,如图2所示。

图像过大影响处理速度,图像分辨率设为 $640$ 像素 $\times$  $480$ 像素,格式为jpg。图像采用RGB彩色模型,为24位真彩色图像,能较好地保留现场的色彩信息。

图像采集时对同一位置的苹果在白天和夜间分别取样拍摄,以便对比夜间图像区别于白天图像的特点。其中白天图像采集时间是9:00~10:00,晴天有阳光直射。为进行系统比较并未对拍摄方位进行严格限定。夜间图像采集时,为了使图像清晰颜色分明,有利于后续图像的识别,采用人工光源进行辅助照明。采集图像如图1所示。

### 1.2 光源选择

实验发现夜间图像的拍摄效果很大程度上受到光源的强度、色温、显色性等特性影响。前文所述夜间图像是在白色LED灯下采集的图像,本节图像是在同样实验条件下,使用其他光源照明采集的。通过对比不同光源下的图像,比较得出更适合夜间识别的光源。实验共准备了3种光源:白色LED、白色荧光灯、白炽灯。

图3展示了3种不同光源下采集的图像及其图中不同景物的 $R$ 、 $G$ 、 $B$ 分量。3种曲线分别表示图像中水平黑色虚线处像素对应的 $R$ 、 $G$ 、 $B$ 分量。

白炽灯的色温为2700K属于暖色光,荧光灯和LED色温大于5000K是冷色光<sup>[21]</sup>。此外光源的显色性对于夜间图像识别也很重要。其中白炽灯的显色性是100,而LED灯和节能灯的显色性<sup>[22]</sup>只在70~80之间。

观察对比3组图像,在色彩表现方面白色LED图像(图3a)的色彩偏冷,色彩饱和度不高;白色荧光灯的图像(图3b)色彩表现稍好,而白炽灯下采集的图像(图3c)色彩饱和度高,色彩表现最优,苹果的色彩更接近真实情况。此外通过对不同景物 $R$ 、 $G$ 、 $B$ 分量大小的对比,白炽灯下图像中苹果的 $R$ 分量与 $G$ 、 $B$ 分量的差距较大;而另2种灯光下 $R$ 分量的优势有所不如。鉴于白炽灯光下图像的优势,后



图 2 夜间不同数量 LED 照明下图像对比

Fig. 2 Comparison of pictures in different number of LED lamps

(a) 1 盏 (b) 2 盏

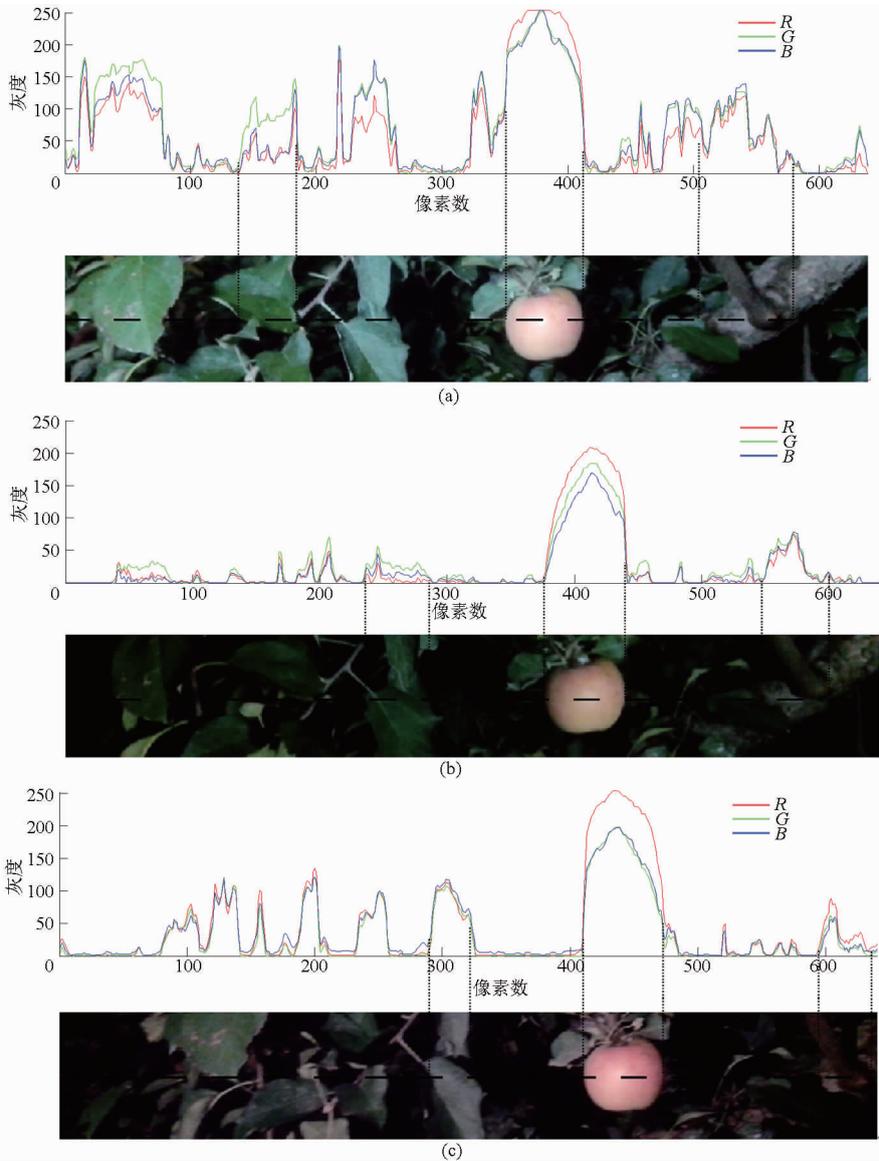


图 3 不同光源下图像中景物的  $R, G, B$  分量

Fig. 3  $R, G, B$  components of pictures in different lights

(a) LED 灯 (b) 荧光灯 (c) 白炽灯

续图像识别中使用的原始图像采集,将用白炽灯作为辅助照明光源。此外为避免阴影的影响,将采用2盏白炽灯间隔1 m布置并距离拍摄对象约2 m进行拍摄。

## 2 色差分割

采用 Intel Core i3 2.53 GHz CPU、4 GB 内存计算机,配合 WIN7、Matlab 2013 作为实验平台。通过对比白天和夜间图像中不同景物的颜色特征,提出改进  $R-G$  色差分割法即首先对夜间图像的  $R$  分量图像进行  $\gamma = 1.5$  的伽玛变换,再进行  $R-G$  操作。改进  $R-G$  分割算法较原始  $R-G$  算法,能大大降低背景噪声。

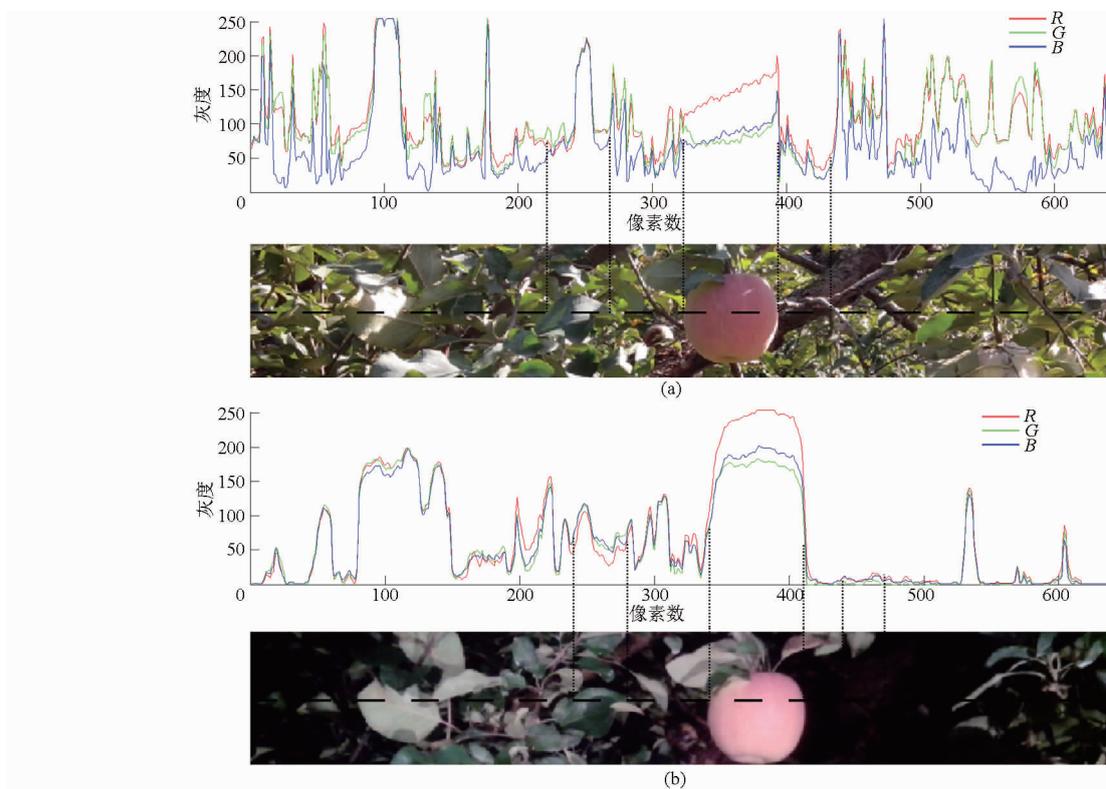


图4 白天和夜间图像色彩分布

Fig. 4 Color distribution of pictures at daytime and night

(a) 白天图像 (b) 夜间图像

## 2.2 色彩分割算法的改进

不同的色彩特征决定了白天图像传统的 RGB 色差分割方法<sup>[1]</sup>并不适用于夜间图像。图 5a 是 2 盏白炽灯下拍摄的夜间图像,图 5b 是其经  $R-G$  色差分割后并采用最大类间方差法二值化后的图像。最大类间方差法在 1978 年由 Otsu 提出,该算法是在判决分析最小二乘原理基础上推导得出的,是一种具有客观评价标准的图像分割优化方法<sup>[23]</sup>。

图 5 表明  $R-G$  色差分割法并不能很好地将目标水果从复杂的背景中分割出来,分割图像中含有大量树枝、树叶和其他噪声。要想使  $R-G$  分割法

## 2.1 夜间图像的色彩分析

完成图像采集后,需要进行的工作是将目标水果从复杂的背景中分割出来。由于在 2 盏白炽灯光下拍摄的图像颜色分明,可以采用以颜色信息为基础的分析方法对图像进行分割。首先要分析图像中不同景物的颜色特征。图 4 分别对白天和夜间图像在 RGB 色彩模型下不同景物的色彩信息进行了分解。

观察图 4a 可知,目标水果的  $R、G、B$  分量中  $R$  分量明显大于  $G$  和  $B$  分量,树叶的  $G$  分量最大,树枝的  $R、G、B$  分量较为接近。观察图 4b,目标水果的  $R$  分量同样明显大于  $G$  和  $B$  分量,但是其他景物包括树叶的 3 个颜色分量较为接近,差距不大。

取得较好的效果,需要满足以下 2 个条件:目标水果的  $R$  分量明显大于  $G$  分量;其他景物的  $R$  分量应尽量等于或小于  $G$  分量。夜间图像中除目标水果,某些景物的  $R$  分量稍大于  $G$  分量,难以满足第 2 个条件。

为解决夜间图像的色彩分割问题,本文提出改进  $R-G$  算法。改进  $R-G$  算法主要是通过拉伸  $R$  分量加大目标水果  $R$  分量与  $G$  分量的差并且使其其他景物的  $R$  分量减小并低于  $G$  分量。改进  $R-G$  算法的具体步骤如下:

(1) 将  $R、G、B$  分量的值分别作为像素值把夜

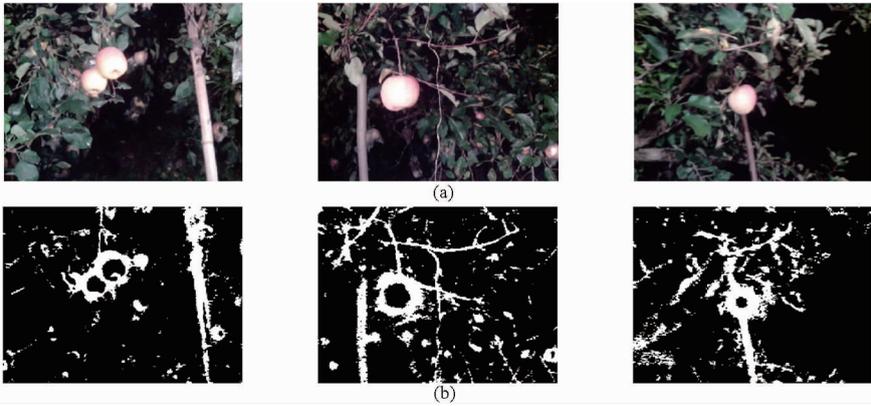


图 5 夜间图像  $R-G$  色差分割效果

Fig. 5  $R-G$  color segmentation effect of night image

(a) 夜间图像 (b) 夜间图像  $R-G$  分割后二值化结果

间图像分离成 3 个灰度图。

(2) 对  $R$  分量灰度图进行伽玛变换, 其中伽玛系数  $\gamma = 1.5$ 。

(3) 再对图像进行  $R-G$  操作, 并通过最大类间方差法进行二值化。

伽玛变换是一种非线性灰度变换, 又被称作指数变换或幂次变换<sup>[23]</sup>。伽玛变换的变换公式为

$$y = (x + k_{esp})^\gamma \quad (x \in [0, 1]; y \in [0, 1]) \quad (1)$$

式中  $k_{esp}$  —— 补偿系数

当  $\gamma > 1$  时, 增强高灰度区域对比度, 减小低灰度区域对比度; 当  $\gamma = 1$  时, 图像不变; 当  $\gamma < 1$  时, 增强低灰度区域对比度, 减小高灰度区域对比度。

图 6 所示为伽玛变换映射图, 图中的灰度被归一化到 0 ~ 1 之间进行变换。当对  $R$  分量图像作  $\gamma = 1.5$  的伽玛变换时, 灰度小于 138 时, 灰度减小,

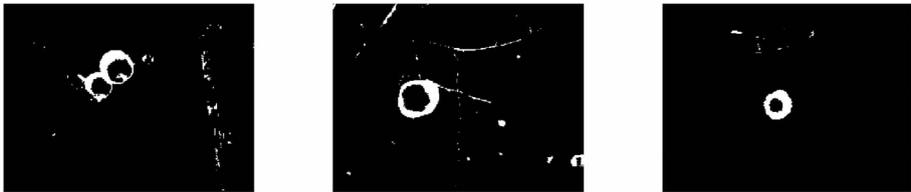


图 6 伽玛变换映射关系图

Fig. 6 Gamma transform mapping

当灰度大于等于 138 时, 灰度增大。即目标水果的  $R$  分量被增大, 其他景物的  $R$  分量被减小, 使夜间图像的  $R、G、B$  分量大小满足以上 2 个条件。图 7 为改进  $R-G$  算法的分割效果图。可以看出图中的噪声大大减小。

图 7 改进  $R-G$  色差分割法效果

Fig. 7 Improved  $R-G$  color segmentation method

### 3 高亮反光区的处理

由于光照的不均匀和水果表面角质层光线反射率高, 采集的夜间图像中部分水果表面会形成高亮的反光区使这部分颜色信息丢失。即使采用改进  $R-G$  分割算法, 仍然不能识别出高亮反光区, 并且还带有少量噪声。本文针对这个问题, 提出二次分割的算法。

$R、G、B$  分量在高亮反光区的差异很小甚至消失, 但是  $R、G、B$  分量也呈现出不同于图像其他景物的特点, 即高亮反光区的  $R、G、B$  分量都很高, 在反

光区中心部分  $R、G、B$  都达到 255。表 1 列出了采集的 10 个反光区边缘点对应的  $R、G、B$  分量值。

从表 1 可以看出即使是高亮反光区边缘点, 其色彩分量值依然很高, 其中  $R$  分量值最高接近 255,  $G$  分量和  $B$  分量值也在 200 以上。根据高亮区高颜色分量的特点, 可以将高亮区单独提取出来。

#### 3.1 一次分割

虽然图像背景中没有成片明显的高亮反光区, 但是也有很多符合高亮区域像素点色彩特征点或连通区。为了屏蔽复杂背景中亮点的干扰, 可以根据改进  $R-G$  算法分割的图像, 大致确定苹果所

表1 高亮反光区边缘点的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  分量值Tab.1  $R, G, B$  component values of dots on the edge of reflective area

分量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
$R$	255	255	255	255	255	254	255	255	252	255	254.6
$G$	243	245	228	230	227	217	240	227	240	241	233.8
$B$	235	236	237	236	231	224	236	226	232	241	233.4

在的区域,并将苹果及附近区域从复杂背景中切割出来,单独处理。这样既减少了运算量,也减少了背景亮点干扰,提高了识别率。

苹果所在区域确定的步骤如下:

(1) 利用计算连通分量的方法,即 Matlab 中的 `bwlabel` 函数<sup>[23]</sup> 标出经改进  $R-G$  算法分割并二值化后的图像(图7)中所有连通区。

(2) 将连通区大小小于图中最大连通区 0.1 倍

的连通区像素值置为 0。这样可以删除背景噪声和距离较远在拍摄位置无法采摘的苹果,以减少干扰。

(3) 确定图中剩余各个连通区域的中心点  $O$  和中心点到达该连通区边缘的最大距离  $r$ 。

(4) 以  $O$  为中心,画一个边长为  $2r$  的正方形。正方形以外像素的颜色分量都置为 0。这样就切割出苹果所在的大致区域,避免了大部分背景的干扰(图8)。

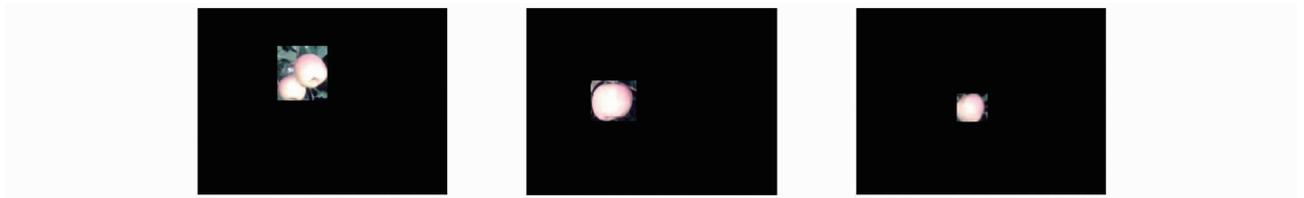


图8 苹果所在区域  
Fig.8 Areas of apples

### 3.2 二次分割

根据表1可知,高亮反光区边缘像素的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  分量平均值分别为 254.6、233.8 和 233.4。为了尽量完整地提取整个高亮反光区,根据统计结果确定  $R$ 、 $G$ 、 $B$  分量范围为 240~255、220~255、210~255。颜色分量在此范围内的像素点,都被作为高亮反光区处理。

图9展示了从图8中识别出目标苹果的完整过程。其中图9a为图8经改进  $R-G$  分割的图像;图9b为从图8中提取的高亮反光区;图9c是图9a和图9b融合后的结果,即将色差分割结果和高亮反光区相加。从图9c中可以看出最终识别出的图像较为完整,能够满足采摘的要求。在此过程中可能会引入少量噪声,只要按照上述滤除小连通区域的

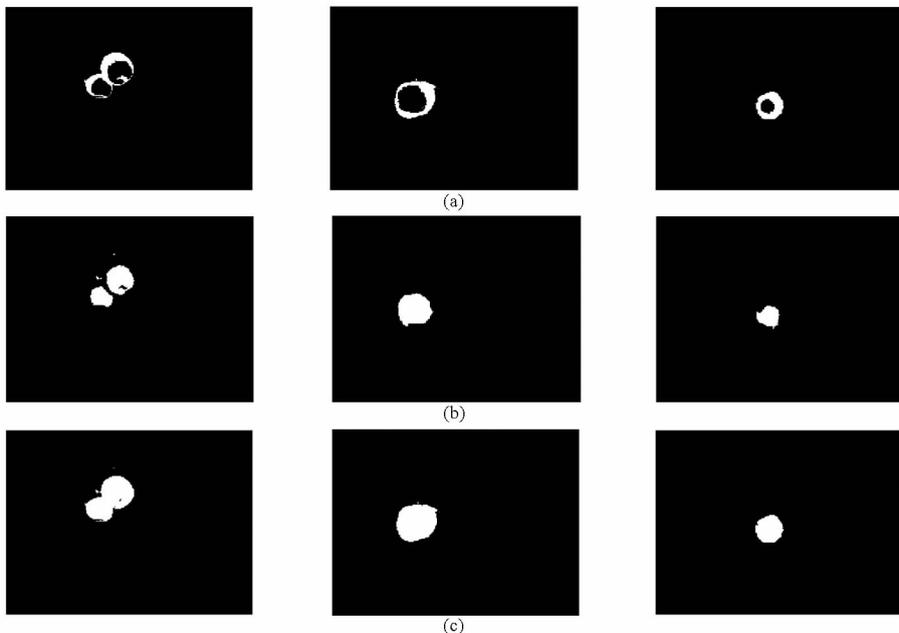


图9 图像融合过程

Fig.9 Fusion process of images

(a) 图8经改进  $R-G$  算法分割的图像 (b) 图8中提取出的高亮反光区 (c) 融合后的图像

方法即可滤除而不影响识别的完整性,在此不再赘述。

结合多角度照明,运用改进  $R-G$  色差分割和高亮反光区处理方法对采集的 60 幅图像进行识别。经统计,不考虑果实的粘连和遮挡等因素,正确识别率为 83.7%。

## 4 结论

(1) 初步验证了苹果夜间图像的机器识别能力,为完善苹果采摘机器人的功能,使其具有夜间采摘的能力,提高工作效率和环境适应能力进行了有益探讨。不考虑果实的粘连和遮挡等因素,正确识别率达到 83.7%。

(2) 使用白炽灯作为光源,采集的图像色彩表现最优。此外采用 2 盏白炽灯从不同角度照明可削

弱阴影,避免阴影的影响。

(3) 针对夜间图像的色彩特征,采用改进型  $R-G$  色差分割法对夜间图像进行分割,较传统 RGB 色差分割法大大减小了背景噪声。

(4) 部分水果表面存在高亮反光区,使色差分割图像不完整,可采用二次分割的方法提取高亮反光区,对残缺图像进行修补,将残缺的部分补充完整,以便苹果的准确定位。

(5) 本项研究是在江苏省徐州市丰县大沙河红富士苹果园的环境下进行的,其方法能否直接适用于其他种类苹果树,还需要进一步实验验证。另外本文是通过颜色特征进行的图像分割,这就需要良好的照明。但是现实环境中由于遮挡、光照不均等原因,这样的照明条件难以保证,因此未来还需要考虑结合苹果的形状等特征识别分割图像。

## 参 考 文 献

- 1 赵文旻. 成熟苹果的图像识别及其位姿的获取研究[D]. 南京:南京农业大学,2012.  
Zhao Wenmin, Image recognition and posture detection of ripe apple based on machine vision[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 2 吕继东. 苹果采摘机器人视觉测量与避障控制研究[D]. 镇江:江苏大学,2012.  
Lü Jidong. Research on vision measurement and obstacle avoidance control of apple harvesting robot[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012. (in Chinese)
- 3 张铁中,杨丽,陈兵旗,等. 农业机器人技术研究进展[J]. 中国科学:信息科技,2010,40(增刊1):71-87.  
Zhang Tiezhong, Yang Li, Chen Bingqi, et al. Research progress of agricultural robot technology[J]. Science China: Information Technology, 2010, 40(Supp. 1): 71-87. (in Chinese)
- 4 毕昆,赵馨,侯睿锋,等. 机器人技术在农业中的应用方向和发展趋势[J]. 中国农学通报,2011,27(4):469-473.  
Bi Kun, Zhao Xin, Hou Ruifeng, et al. The trend of application and development of robot technology in agriculture[J]. Chinese Agriculture Science Bulletin, 2011, 27(4): 469-473. (in Chinese)
- 5 David C, Roy C. Color vision in robotic fruit harvesting[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(4):1144-1148.
- 6 周俊,刘锐,张高阳. 基于立体视觉的水果采摘机器人系统设计[J]. 农业机械学报,2010,41(6):158-162.  
Zhou Jun, Liu Rui, Zhang Gaoyang. Design of fruit harvesting robot based on stereo vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 158-162. (in Chinese)
- 7 Tanigaki K, Fujiura T, Akase A, et al. Cherry-harvesting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(1): 65-72.
- 8 宋健,孙学岩,张铁中,等. 开放式茄子采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(1):143-147.  
Song Jian, Sun Xueyan, Zhang Tiezhong, et al. Design and experiment of opening picking robot for eggplant[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 143-147. (in Chinese)
- 9 赵庆波,赵德安,姬伟,等. 采摘机器人视觉伺服控制系统[J]. 农业机械学报,2009,40(1):152-156.  
Zhao Qingbo, Zhao Dean, Ji Wei, et al. Vision servo control system of fruit harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 152-156. (in Chinese)
- 10 蒋焕煜,彭永石,申川,等. 基于双目立体视觉技术的成熟番茄识别与定位[J]. 农业工程学报,2008,24(8):279-283.  
Jiang Huanyu, Peng Yongshi, Shen Chuan, et al. Recognizing and locating ripe tomatoes based on binocular stereo vision technology[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 279-283. (in Chinese)
- 11 谢志勇,张铁中,赵金英. 基于 Hough 变换的成熟草莓识别技术[J]. 农业机械学报,2007,38(3):106-109.  
Xie Zhiyong, Zhang Tiezhong, Zhao Jinying. Ripened straw berry recognition based on Hough transform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(3): 106-109. (in Chinese)
- 12 蔡健荣,李玉良,范军,等. 成熟柑橘的图像识别及空间定位研究[J]. 微计算机信息,2007,23(12):224-225,314.  
Cai Jianrong, Li Yuliang, Fan Jun, et al. Image recognition and three-dimensional location of mature oranges from nature scene[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(12): 224-225, 314. (in Chinese)
- 13 郑小东,赵杰文,刘木华. 基于双目立体视觉的番茄识别与定位技术[J]. 计算机工程,2004,30(22):115-116,171.  
Zheng Xiaodong, Zhao Jiewen, Liu Muhua. Tomatoes recognition and location from nature background based on binocular stereo

- vision[J]. Computer Engineering, 2004, 30(22): 115 - 116, 171. (in Chinese)
- 14 周俊, 赵高阳, 刘锐, 等. 基于粒子滤波的苹果采摘机器人目标姿态估算[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 161 - 165.  
Zhou Jun, Zhao Gaoyang, Liu Rui, et al. Apple attitude estimation based on particle filter for harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 161 - 165. (in Chinese)
- 15 谢忠红, 徐莹, 姬长英, 等. 基于机器视觉的苹果生长姿态估算识别多方法融合[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 155 - 157, 153.  
Xie Zhonghong, Xu Ying, Ji Changying, et al. Estimation method of apple growing attitude based on computer vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 155 - 157, 153. (in Chinese)
- 16 董坦坦. 成熟番茄的图像识别及其位姿的获取研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.  
Dong Tantan. Image recognition and posture detection of ripe tomato based on machine vision[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 17 姬伟, 陶云, 赵德安, 等. 基于 CLAHE 的苹果树枝迭代阈值分割方法研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 69 - 75.  
Ji Wei, Tao Yun, Zhao Dean, et al. Iterative threshold segmentation of apple branch images based on CLAHE[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 69 - 75. (in Chinese)
- 18 王辉, 毛文华, 刘刚, 等. 基于视觉组合的苹果作业机器人识别与定位[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 165 - 170.  
Wang Hui, Mao Wenhua, Liu Gang, et al. Identification and location system of multi-operation apple robot based on vision combination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 165 - 170. (in Chinese)
- 19 Font D, Pallejà T, Tresanchez M, et al. Counting red grapes in vineyards by detecting specular spherical reflection peaks in RGB images obtained at night with artificial illumination[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 108: 105 - 111.
- 20 Payne A, Walsh K, Subedi P, et al. Estimating mango crop yield using image analysis using fruit at 'stone hardening' stage and night time imaging[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 100: 160 - 167.
- 21 代彩红, 于家琳. 光源相关色温计算方法的讨论[J]. 计量学报, 2000, 21(3): 183 - 188.  
Dai Caihong, Yu Jialin. Discussion on the calculating methods for color temperature of the source[J]. Acta Metrologica Sinica, 2000, 21(3): 183 - 188. (in Chinese)
- 22 李志杰, 李倩倩. 光源的显色性理论[J]. 光源与照明, 2008(2): 12 - 15.
- 23 张铮, 倪红霞, 苑春苗, 等. 精通 Matlab 数字图像处理与识别[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.

~~~~~

(上接第 14 页)

- 22 Keerthi S S, Lin C J. Asymptotic behaviors of support vector machines with Gaussian kernel[J]. Neural Computation, 2003, 15(7): 1667 - 1689.
- 23 Lin K M, Lin C J. A study on reduced support vector machines[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2003, 14(6): 1449 - 1459.
- 24 王兴玲, 李占斌. 基于网格搜索的支持向量机核函数参数的确定[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2005, 35(5): 859 - 862.  
Wang Xingling, Li Zhanbin. Identifying the parameters of the kernel function in support vector machines based on the grid-search method[J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, 35(5): 859 - 862. (in Chinese)
- 25 刘涛, 孙成明, 王力坚, 等. 基于图像处理技术的大田麦穗计数[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 282 - 290.  
Liu Tao, Sun Chengming, Wang Lijian, et al. In-field wheat ear counting based on image processing technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 282 - 290. (in Chinese)
- 26 王海青, 姬长英, 顾宝兴, 等. 基于机器视觉和支持向量机的温室黄瓜识别[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 163 - 167.  
Wang Haiqing, Ji Changying, Gu Baoxing, et al. In-greenhouse cucumber recognition based on machine vision and least squares support vector machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 163 - 167. (in Chinese)
- 27 张建华, 冀荣华, 袁雪, 等. 基于径向基支持向量机的棉花虫害识别[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 178 - 183.  
Zhang Jianhua, Ji Ronghua, Yuan Xue, et al. Recognition of pest damage for cotton leaf based on RBF - SVM algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 178 - 183. (in Chinese)