

# 番茄采摘机器人夜间照明系统设计与试验

项 荣 段鹏飞

(中国计量学院质量与安全工程学院, 杭州 310018)

**摘要:** 基于试验设计方法实现了番茄采摘机器人夜间照明系统设计。提出了一种基于前景与背景类间方差和类内方差比值  $F$  的图像可分割性评价指标作为确定最佳试验方案即最佳照明系统的评价指标;考虑了光源种类、光源布局及图像采集距离 3 个试验因子;采用正交试验表  $L_{18}(6 \times 3^6)$  安排试验。试验结果表明:光源种类和光源布局是影响番茄采摘机器人夜间照明系统的显著因子,图像采集距离为不显著因子;光源种类因子各水平中,荧光灯照射时图像的  $F$  最大,为 2.159;光源布局因子各水平中,对角布局时图像的  $F$  最大,为 2.234。因此,所设计的番茄采摘机器人夜间照明系统的最佳组合为:荧光灯、对角布局。将试验结果与基于归一化  $R-G$  色差的 OTSU 自动阈值图像分割算法的分割效果进行了对比,对比结果验证了基于该图像可分割性评价指标  $F$  的夜间照明系统设计方法的有效性。

**关键词:** 番茄; 采摘机器人; 夜间照明系统; 试验设计; 图像分割

**中图分类号:** TP242; TP391      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0008-07

## Design and Experiment of Night Lighting System for Tomato Picking Robot

Xiang Rong   Duan Pengfei

(College of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** A design method for night lighting system of tomato picking robots based on experiments design was presented. In the design of experiments, an image segmentation evaluation index, which could determine the optimal night lighting system, was proposed. It was calculated as the ratio of  $F$  between intra-class and inter-class variances of foreground and background of tomato images captured at night. Three factors, including light source type, light source layout and image acquisition distance, were considered. Moreover, orthogonal experiment table  $L_{18}(6 \times 3^6)$  was used to arrange experiments. Testing results showed that, the light source type and light source layout were two significant factors for night lighting system, while the image acquisition distance was not. So, it is focused on the influence of light source type and light source layout in the night lighting system. Meanwhile, the  $F$  value of fluorescent lamp was 2.159 which was the highest among those values of six types of light source type, and that of the diagonal layout was 2.234 which was the highest among the values of three types of light source layout. Therefore, in the current trial, the optimal light was fluorescent lamp, and the best light source layout was diagonal layout for the night lighting system of tomato picking robot.  $F$  values of tomato images captured at night were compared with image segmentation results using the OTSU algorithm based on normalized  $R-G$  color difference. Comparative results showed that the image segmentation results were better for images with higher  $F$ . The image segmentation evaluation index based on  $F$  and the design method for night lighting system are effective.

**Key words:** tomato; picking robot; night lighting system; experiment design; image segmentation

引言

目前,果蔬采摘机器人是农业机器人领域的研究热点<sup>[1-2]</sup>。视觉系统作为果蔬采摘机器人的重要组成部分,可实现果蔬识别和 3D 定位<sup>[3]</sup>。当前果蔬采摘机器人视觉系统研究主要集中在白天自然光照条件下。由于果蔬具有成熟期短、时令性强、需进行适时采摘等特点,在果蔬成熟期,为了尽快完成采摘作业、延长采摘作业时间,急需一种适合全天候作业的果蔬采摘机器人<sup>[4-6]</sup>。

近年来,国内外学者已开始对用于夜间果蔬识别的视觉系统进行研究<sup>[7-13]</sup>,但对用于夜间果蔬识别的照明系统报道较少。同时,不同果蔬的光学特性不同,适宜的照明系统可突显果蔬与背景间的特征差异,使图像具有较好的可分割性,进而提高果蔬识别成功率。为实现番茄采摘机器人夜间照明系统设计,本文提出一种以前景与背景类间方差和类内方差比值  $F$  为试验指标、基于试验设计的番茄采摘机器人夜间照明系统设计方法。

1 试验设备和方法

1.1 试验材料和设备

试验材料为杭州职业技术学院温室中种植的欧诺(改良型)粉果番茄。图像采集时间为 2015 年 10 月 21、25、26 日 19:00—23:00。使用 PointGrey Research 公司的 Bumblebee2 型双目立体相机进行成熟番茄图像采集。所采集图像存储为 JPG 格式(320 像素×240 像素)。双目立体相机安装于三脚架,通过 1394 连接线和采集卡与计算机相连。计算机为 Acer Aspire 4738G,编程环境为 Matlab R2011a。

图像分割是实现目标识别和定位的前提,因此夜视番茄图像的可分割性是进行番茄采摘机器人夜间照明系统设计的主要依据。图像可分割性指图像可被分割的难易程度。图像中前景特征和背景特征差异越显著,越容易实现图像分割,图像可分割性越好。夜视番茄图像可分割性主要受图像采集时光源布局、光照强度、色温、显色性、采集距离等因素影响。为便于对光源布局和光源种类进行选择,设计了一种光源支架,如图 1 所示。通过开关控制不同光源布局,共有 3 种布局方式,分别是对角长度为 400 mm 的菱形布局(ABCD)、长×宽分别为 500 mm×400 mm 的长方形布局(EFGH)以及对角布局(FH)等。长方形布局和菱形布局是根据目前现有光源布局方式进行适当改进所得,对角布局是参照文献[7]中 2 盏光源从不同角度照射而提出的光源布

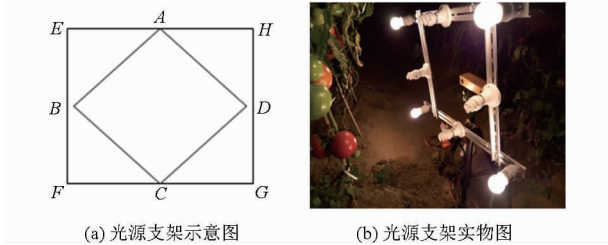


图 1 夜间照明系统

Fig. 1 Night lighting system

局方式。

1.2 基于试验设计的夜间照明系统设计方法

基于试验设计的番茄采摘机器人夜间照明系统的设计方法流程图如图 2 所示。基于正交设计思想进行试验方案设计,确定候选夜间照明系统;根据试验方案搭建相应的夜间照明系统,并采集相应的夜视番茄图像;计算各夜视番茄图像的  $F$ (前景与背景类间方差和类内方差比值)以评价其可分割性,并根据  $F$  确定最佳试验方案,即确定候选夜间照明系统中的最佳夜间照明系统。

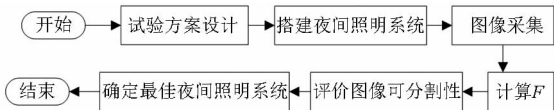


图 2 番茄采摘机器人夜间照明系统设计流程图

Fig. 2 Design flowchart of night lighting system for tomato picking robots

1.2.1 试验目的

试验目的是构建一个适用的番茄采摘机器人夜间照明系统,以提高在夜间照明系统下采集的夜视番茄图像的可分割性,为后续夜视番茄图像分割处理提供高质量(本文指图像可分割性好)的夜视番茄图像。

1.2.2 试验指标

为确定最佳试验方案,提出一种基于  $F$  的评价指标以定量评价图像可分割性,并将此作为试验指标。根据该试验指标的最大原则确定最佳试验方案。

类间方差和类内方差分别反映前景和背景类间、类内的灰度波动<sup>[14]</sup>。类间方差越大,类内方差越小,则  $F$  越大,即前景和背景间灰度差异越大,前景与背景的类内灰度一致性越好。类间方差变小或类内方差变大,相应的  $F$  减小,即前景和背景间灰度差异变小,前景与背景的类内灰度一致性变差。因此, $F$  可用于灰度图像可分割性的定量评价。

在夜视番茄图像可分割性评价中,将成熟番茄作为前景,树叶、枝干、土壤等作为背景。夜视番茄图像  $F$  计算方法如下:

首先,使用 Photoshop 软件中的抠图工具将图像

人工分割为前景和背景,并分别另存为前景图像和背景图像,同时得到前景部分像素总数  $N_F$  和背景部分像素总数  $N_B$ 。前景在样本图像中的分布概率  $\omega_F$  以及背景在样本图像中的分布概率  $\omega_B$  计算式分别为

$$\omega_F = N_F / (N_F + N_B)$$

(1)

$$\omega_B = N_B / (N_F + N_B)$$

(2)

对前景图像和背景图像进行灰度化处理。由于成熟番茄和背景之间有明显的红绿色差,因此采用  $R-G$  色差对图像进行灰度化处理, $R$ 、 $G$  分别表示 RGB 彩色空间的红、绿颜色分量。灰度化处理后番茄部分的灰度均值  $\mu_F$  和方差  $\sigma_F^2$  计算式分别为

$$\mu_F = \sum_{i=1}^{N_F} P_i / N_F$$

(3)

$$\sigma_F^2 = \sum_{i=1}^{N_F} (P_i - \mu_F)^2 / N_F$$

(4)

式中  $P_i$ ——前景部分灰度矩阵中第  $i$  个点的灰度  
灰度化处理后背景部分的灰度均值  $\mu_B$  和方差  $\sigma_B^2$  计算式分别为

$$\mu_B = \sum_{j=1}^{N_B} P_j / N_B$$

(5)

$$\sigma_B^2 = \sum_{j=1}^{N_B} (P_j - \mu_B)^2 / N_B$$

(6)

式中  $P_j$ ——背景部分灰度矩阵中第  $j$  个点的灰度

番茄和背景之间的类间方差  $\sigma_o^2$  和类内方差  $\sigma_i^{2[15]}$  以及  $F$  的计算式分别为

$$\sigma_o^2 = \omega_F \omega_B (\mu_F - \mu_B)^2$$

(7)

$$\sigma_i^2 = \omega_F \sigma_F^2 + \omega_B \sigma_B^2$$

(8)

$$F = \sigma_o^2 / \sigma_i^2$$

(9)

根据夜视番茄图像的  $F$ ,定量地对夜视番茄图像的可分割性进行评价。 $F$  最大的夜视番茄图像对应的照明系统设计方案为最佳试验方案,并最终将被选为番茄采摘机器人夜间照明系统。

1.2.3 确定因子和水平

考虑到对番茄夜视图像可分割性的影响,番茄采摘机器人夜间照明系统设计主要考虑 3 个因子:光源种类、光源布局和图像采集距离。其中,光源种类有 6 个水平:白炽灯 15 W、白色 LED 灯 3 W、卤素灯 18 W、白炽灯 25 W、荧光灯 3 W 和红色 LED 灯 3 W。选择 15 W 和 25 W 这 2 种功率的白炽灯,目的是比较同种光源不同光照强度下照明效果的差异。光源布局有 3 个水平:长方形布局、菱形布局、对角布局。图像采集距离有 3 个水平:300、500、700 mm。

1.2.4 选用正交表

为减少工作量,采用正交试验设计方法进行试验设计。根据上述试验因子和水平,采用正交试验表  $L_{18}(6 \times 3^6)$  安排试验,如表 1 所示。

表 1 用于夜间照明系统设计的  $L_{18}(6 \times 3^6)$  正交试验

Tab.1 Orthogonal experiment of  $L_{18}(6 \times 3^6)$  for design of night lighting system

| 试验编号 | 光源种类     | 图像采集距离/mm | 光源布局 | 试验编号 | 光源种类         | 图像采集距离/mm | 光源布局 |
|------|----------|-----------|------|------|--------------|-----------|------|
| 1    | 白炽灯 15 W | 300       | 长方形  | 10   | 红色 LED 灯 3 W | 300       | 菱形   |
| 2    | 白炽灯 15 W | 500       | 菱形   | 11   | 红色 LED 灯 3 W | 500       | 对角   |
| 3    | 白炽灯 15 W | 700       | 对角   | 12   | 红色 LED 灯 3 W | 700       | 长方形  |
| 4    | 卤素灯 18 W | 300       | 长方形  | 13   | 白色 LED 灯 3 W | 300       | 对角   |
| 5    | 卤素灯 18 W | 500       | 菱形   | 14   | 白色 LED 灯 3 W | 500       | 长方形  |
| 6    | 卤素灯 18 W | 700       | 对角   | 15   | 白色 LED 灯 3 W | 700       | 菱形   |
| 7    | 荧光灯 3 W  | 300       | 菱形   | 16   | 白炽灯 25 W     | 300       | 对角   |
| 8    | 荧光灯 3 W  | 500       | 对角   | 17   | 白炽灯 25 W     | 500       | 长方形  |
| 9    | 荧光灯 3 W  | 700       | 长方形  | 18   | 白炽灯 25 W     | 700       | 菱形   |

2 试验结果与分析

按照表 1 所示的试验方案,搭建相应的夜间照明系统,共 18 种。对 6 株番茄分别在 18 种夜间照明系统下各采集 1 幅夜视番茄图像,共 108 幅。图 3 为其中 1 株番茄植株对应的 18 幅夜视番茄图像。

如图 3a~3f 所示,白炽灯和卤素灯在长方形布局 and 菱形布局时,图像存在光晕。主要原因为:在白炽灯和卤素灯的连续光谱中,红色波长所占比例较大<sup>[16]</sup>。在图像采集过程中,空气中悬浮的粉尘颗粒会使光线产生反射现象,在图像中以红色光晕形式

存在,影响图像质量。因此在使用白炽灯或卤素灯作为辅助照明光源进行图像采集时,要注意采取防尘措施,尽量在灰尘含量低的环境下作业。

2.1 图像可分割性评价结果与分析

为寻找影响番茄采摘机器人夜间照明系统的显著试验因子,对采集的 108 幅夜视番茄图像计算其  $F$ ,并对  $F$  进行方差分析,结果如表 2 所示。

由表 2 可见,光源种类和光源布局的  $P$  均小于 0.05,表明这 2 个试验因子为显著因子。图像采集距离的  $P$  为 0.320,远大于 0.05,表明其为不显著因子,所以实际情况下可根据后续图像处理的需求进

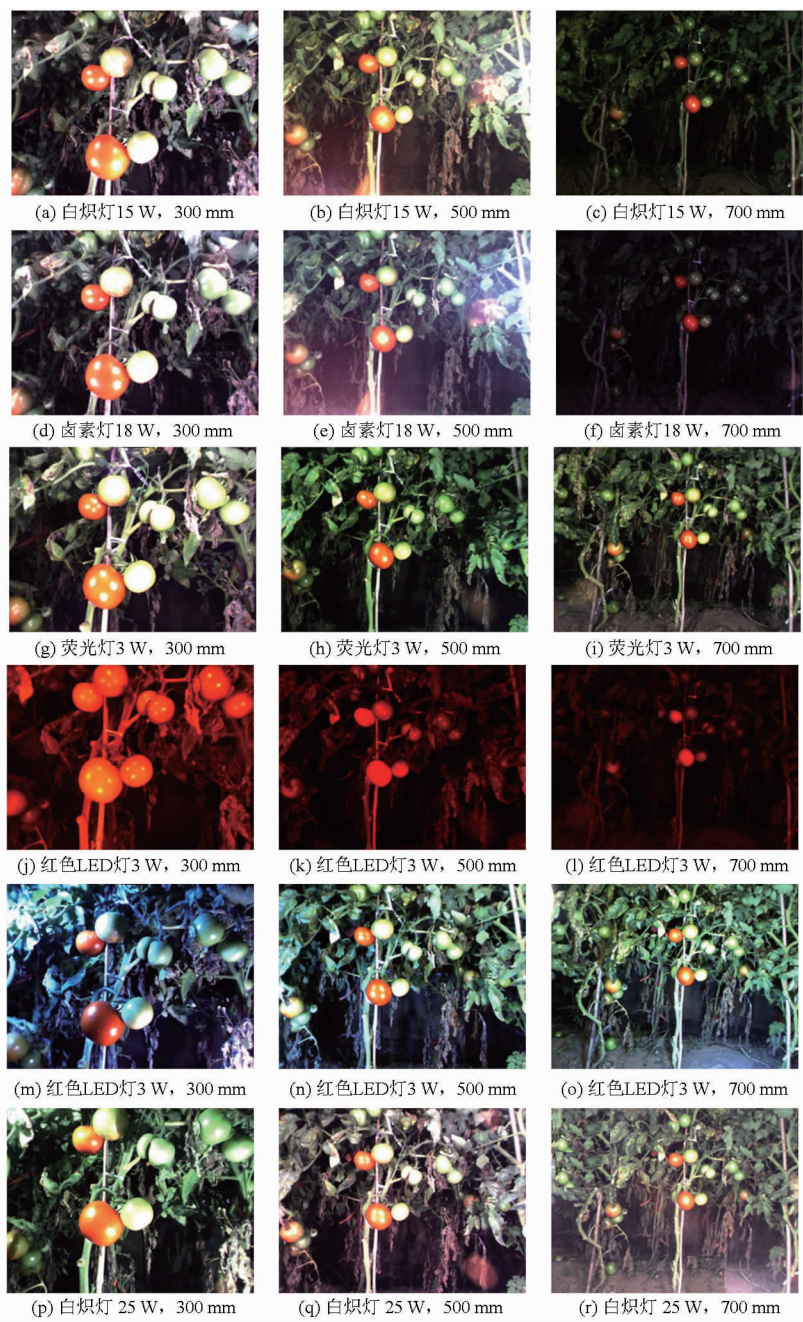


图 3 夜间照明系统照明下采集的夜视番茄图像

Fig. 3 Tomato images captured under lighting conditions using night lighting system

表 2 方差分析  
Tab. 2 Variance analysis

| 方差来源   | 自由度 | 顺序平方和   | 调整平方和  | 调整均方   | 均方差比    | <i>P</i> |
|--------|-----|---------|--------|--------|---------|----------|
| 光源种类   | 5   | 6. 955  | 6. 955 | 1. 391 | 8. 560  | 0. 005   |
| 图像采集距离 | 2   | 0. 428  | 0. 428 | 0. 214 | 1. 320  | 0. 320   |
| 光源布局   | 2   | 5. 914  | 5. 914 | 2. 957 | 18. 190 | 0. 001   |
| 误差     | 8   | 1. 301  | 1. 301 | 0. 163 |         |          |
| 合计     | 17  | 14. 598 |        |        |         |          |

行合理选择。为确定显著试验因子光源种类和光源布局的最佳水平,即夜间照明系统的最佳光源和最佳光源布局,通过使用统计软件 Minitab 中的田口设计进行分析。田口设计是一种试验设计方法,主要

采用正交试验表安排设计方案,对每个因子独立于其他因子进行评估<sup>[17]</sup>。对 6 株番茄对应的 6 组夜视番茄图像 *F* 进行田口分析,如表 3 所示。其中,对于光源种类这一试验因子,各水平的 *F* 为对应光源布局 3 个水平下的 *F* 均值;对于光源布局这一试验因子,各水平的 *F* 为对应光源种类 6 个水平下的 *F* 均值。

由表 3 可知:对于光源种类这一试验因子,6 组夜视番茄图像中,荧光灯作为照明光源时对应的夜视番茄图像的 *F* 均最大,平均值为 2. 159;红色 LED 灯对应的夜视番茄图像的 *F* 均最小。由 *F* 最大原则可知,番茄采摘机器人夜间照明系统以荧光灯作



表 3 显著因子各水平对应的夜视番茄图像  $F$

Tab. 3  $F$  values of night-vision tomato images corresponding to each level of significant factors

| 试验因子 | 水平           | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 平均值    |
|------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 光源种类 | 白炽灯 15 W     | 2. 884 | 1. 853 | 1. 950 | 0. 582 | 1. 599 | 1. 555 | 1. 737 |
|      | 卤素灯 3 W      | 2. 845 | 1. 837 | 1. 725 | 0. 551 | 0. 925 | 1. 504 | 1. 565 |
|      | 荧光灯 3 W      | 3. 103 | 2. 214 | 2. 339 | 1. 540 | 2. 118 | 1. 641 | 2. 159 |
|      | 红色 LED 灯 3 W | 0. 289 | 0. 203 | 0. 341 | 0. 188 | 0. 445 | 0. 518 | 0. 331 |
|      | 白色 LED 灯 3 W | 2. 905 | 1. 865 | 2. 308 | 1. 136 | 1. 628 | 1. 575 | 1. 903 |
|      | 白炽灯 25 W     | 2. 173 | 0. 706 | 0. 958 | 0. 393 | 0. 363 | 1. 031 | 0. 937 |
| 光源布局 | 对角           | 3. 336 | 2. 253 | 2. 415 | 1. 456 | 2. 122 | 1. 822 | 2. 234 |
|      | 长方形          | 1. 894 | 1. 272 | 1. 413 | 0. 535 | 0. 818 | 1. 155 | 1. 181 |
|      | 菱形           | 1. 870 | 0. 815 | 0. 983 | 0. 204 | 0. 599 | 0. 935 | 0. 901 |

为照明光源时采集得到的夜视番茄图像可分割性最好,红色 LED 灯照明时采集得到的夜视番茄图像可分割性最差。另外,由于 25W 白炽灯对应的夜视番茄图像的  $F$  小于 15W 白炽灯对应的夜视番茄图像的  $F$ ,所以夜间照明系统所使用光源的光照强度不宜太大。

对于光源布局这一试验因子,6 组夜视番茄图像中,光源布局采用对角布局时对应的夜视番茄图像的  $F$  均明显大于其余 2 种光源布局对应的夜视番茄图像的  $F$ ,平均值为 2. 234。根据  $F$  最大原则,采用对角布局时,得到的夜视番茄图像可分割性最好。

因此,番茄采摘机器人夜间照明系统采用荧光灯、对角布局照明系统。

2.2 夜间照明系统设计方法有效性验证

为验证夜间照明系统设计方法的有效性,对各试验方案所采集的夜视番茄图像进行图像分割,并验证  $F$  与图像分割效果间的一致性。即  $F$  越大的夜视番茄图像,图像分割效果应越佳;反之, $F$  越小,夜视番茄图像分割效果应越差。成熟番茄与背景之间存在明显的红绿色差,因此采用基于归一化  $R - G$  色差的 OTSU 自动阈值分割方法<sup>[7, 18-21]</sup>对夜视番茄图像进行图像分割。对夜视番茄图像的分割效果分别进行目视定性评价和定量评价,以评价夜间照明系统设计方法的有效性。

2.2.1 定性评价

对 108 幅夜视番茄图像的分割结果进行目视定性评价,以比较其图像分割效果的差异。限于篇幅,本文仅列举了长方形布局时 6 类光源对应的夜视番茄图像分割效果及使用荧光灯作为光源时的 3 类光源布局对应的夜视番茄图像的分割效果。

图 4 为 6 类光源在长方形布局时对应的夜视番茄图像分割效果。图 5 为使用荧光灯照明时 3 种光源布局对应的夜视番茄图像分割效果。图 4 及图 5 中,部分番茄区域中存在的黑色区域为高光区,需进

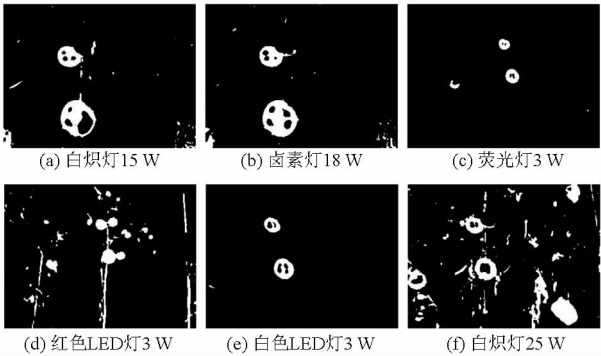


图 4 光源种类因子各水平对应夜视番茄图像的图像分割结果

Fig. 4 Image segmentation results of night-vision tomato images corresponding to each level of light source type

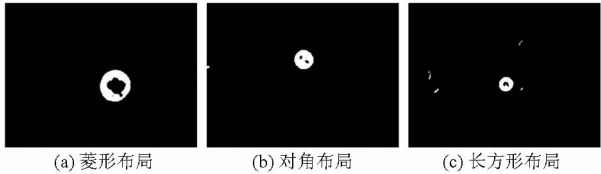


图 5 光源布局因子各水平对应夜视番茄图像的图像分割结果

Fig. 5 Image segmentation results of night-vision tomato images corresponding to each level of light source layout

行后期处理。

由图 4 可见,从视觉上观察,荧光灯作为夜间照明系统光源时,对应的夜视番茄图像分割效果最好,其次是白色 LED 灯,其他光源照明时的夜视番茄图像分割效果较差。由图 5 可知,采用对角布局时,对应的夜视番茄图像分割效果最佳。

通过对夜视番茄图像分割效果的定性评价,可知图像分割效果较好的夜视番茄图像其  $F$  也相应较大。初步验证了以  $F$  作为试验指标的番茄采摘机器人夜间照明系统设计方法的有效性。

2.2.2 定量评价

为定量评价夜视番茄图像分割效果,将假阳误分割率和假阴误分割率作为评价指标<sup>[22]</sup>。

假阳误分割率是将背景像素误分割为番茄像素

的概率,计算式为

$$F_p = \frac{N_p}{N_b} = \frac{N_b - N_{sb}}{N_b} \times 100\%$$

(10)

式中  $F_p$ ——假阳误分割率,%  
 $N_p$ ——背景被误分割为番茄的像素数  
 $N_b$ ——背景像素总数  
 $N_{sb}$ ——分割后的背景像素数

假阴误分割率是将番茄像素误分割为背景像素的概率,计算式为

$$F_b = \frac{N_n}{N_t} = \frac{N_t - N_{sf}}{N_t} \times 100\%$$

(11)

式中  $F_b$ ——假阴误分割率,%  
 $N_n$ ——番茄被误分割为背景的像素数  
 $N_t$ ——番茄像素总数  
 $N_{sf}$ ——分割后的番茄像素数

根据式(10)、(11)可计算出每幅样本图像的  $F_p$  和  $F_b$ 。基于田口设计分别得到 6 组夜视番茄图像在光源种类 3 个水平下及光源布局 6 个水平下的  $F_p$  和  $F_b$ ,进而得到光源种类和光源布局这 2 个因子各水平下 6 组夜视番茄图像的  $F_p$  和  $F_b$  均值(计算 2 个因子中某个因子在某水平下的  $F_p$  和  $F_b$  均值时,另一因子取其所有水平),结果如表 4 所示。为了便于比较,表 4 中同时列出了相应的  $F$  均值。

由表 4 可知,对于光源种类这一试验因子,荧光灯对应的夜视番茄图像假阳误分割率最小,只有 0.18%。此外,荧光灯、白色 LED 灯、白炽灯、卤素灯对应的夜视番茄图像假阴误分割率基本相当。虽然红色 LED 灯照射时,夜视番茄图像的假阴误分割率最低,但是假阳误分割率最高,表明红色 LED 灯作为照明光源时对红色番茄的分割效果较好,但对背景的分割效果较差,整体分割效果不理想。因此,选用荧光灯作为照明光源。

由表 4 可知,对于光源布局这一试验因子,对角布局作为照明系统的光源布局时,夜视番茄图像的假阴误分割率和假阳误分割率均最低,分别为

表 4 不同试验因子与水平时夜视番茄图像的误分割率

Tab.4 False segmentation rates of night-vision tomato images under different experimental factors and levels

| 试验因子 | 水平           | 假阳误分割率/% | 假阴误分割率/% | $F$ 均值 |
|------|--------------|----------|----------|--------|
| 光源种类 | 白炽灯 15 W     | 2.43     | 9.21     | 1.737  |
|      | 卤素灯 3 W      | 3.05     | 9.10     | 1.565  |
|      | 荧光灯 3 W      | 0.18     | 9.84     | 2.159  |
|      | 红色 LED 灯 3 W | 12.54    | 5.28     | 0.331  |
|      | 白色 LED 灯 3 W | 0.41     | 10.34    | 1.903  |
|      | 白炽灯 25 W     | 8.00     | 9.38     | 0.937  |
| 光源布局 | 对角           | 1.41     | 6.18     | 2.234  |
|      | 长方形          | 3.71     | 7.97     | 1.181  |
|      | 菱形           | 8.17     | 11.08    | 0.901  |

6.18% 和 1.41%,表明采用对角布局时,夜视番茄图像的分割效果较好。

此外,由表 4 可见,夜视番茄图像的假阳误分割率随着  $F$  的增大而减小,表明基于前景与背景类间方差和类内方差比  $F$  的图像可分割性评价结果与图像实际分割效果定量评价的结果一致,进一步验证了以图像可分割性评价指标  $F$  作为试验指标的番茄采摘机器人夜间照明系统设计方法的有效性。

3 结论

(1)基于试验设计的番茄采摘机器人夜间照明系统设计方法可有效实现夜间照明系统设计,其中光源种类和光源布局是影响该照明系统的显著因子,图像采集距离为不显著因子。使用荧光灯作为照明光源时采集得到的夜视番茄图像  $F$  为 2.159;使用对角布局照射时采集得到的夜视番茄图像  $F$  为 2.234。因此,在现有的试验范围内,使用荧光灯和对角布局可组成番茄采摘机器人夜间视觉系统的最佳照明系统。

(2)在基于试验设计的番茄采摘机器人夜间照明系统设计中,基于前景与背景类间方差和类内方差比值  $F$  的图像可分割性评价指标可作为确定最佳试验方案的试验指标。

参 考 文 献

1 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]. 农业机械学报,2013,44(11):208-223.  
XIANG Rong, YING Yibin, JIANG Huanyu. Development of real-time recognition and localization method for fruits and vegetables in field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(11):208-223. (in Chinese)

2 宋健,张铁中,徐丽明,等. 果蔬采摘机器人研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2006,37(5):158-162.  
SONG Jian, ZHANG Tiezhong, XU Liming, et al. Research actuality and prospect of picking robot for fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(5):158-162. (in Chinese)

3 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)

- 4 HAYASHI S, SHIGEMATSU K, YAMAMOTO S, et al. Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 105(2): 160 – 171.
- 5 AREFI A, ASAD M M, KAVEH M, et al. Recognition and localization of ripen tomato based on machine vision [J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2011, 5(10): 1144 – 1149.
- 6 项荣, 应义斌, 蒋焕煜, 等. 基于双目立体视觉的番茄定位[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(5): 161 – 167.  
XIANG Rong, YING Yibin, JIANG Huanyu, et al. Localization of tomatoes based on binocular stereo vision[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(5): 161 – 167. (in Chinese)
- 7 赵德安, 刘晓洋, 陈玉, 等. 苹果采摘机器人夜间识别方法[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 15 – 22.  
ZHAO Dean, LIU Xiaoyang, CHEN Yu, et al. Image recognition at night for apple picking robot[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 15 – 22. (in Chinese)
- 8 FU Longsheng, WANG Bin, CUI Yongjie, et al. Kiwifruit recognition at nighttime using artificial lighting based on machine vision [J]. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 2015, 8(4): 52 – 59.
- 9 贾伟宽, 赵德安, 阮承志, 等. 苹果夜视图像小波变换与独立成分分析融合降噪方法[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(9): 9 – 17.  
JIA Weikuan, ZHAO Dean, RUAN Chengzhi, et al. Combined method for night vision Image denoising based on wavelet transform and ICA[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(9): 9 – 17. (in Chinese)
- 10 贾伟宽, 赵德安, 阮承志, 等. 苹果采摘机器人夜间图像降噪算法[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 219 – 226.  
JIA Weikuan, ZHAO Dean, RUAN Chengzhi, et al. De-noising algorithm of night vision image for apple harvesting robot[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(10): 219 – 226. (in Chinese)
- 11 LINKER R, KELMAN E. Apple detection in nighttime tree images using the geometry of light patches around highlights[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 114: 154 – 162.
- 12 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.
- 13 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.
- 14 孙俊, 武小红, 张晓东, 等. 基于 MFICSC 算法的生菜图像目标聚类分割[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(13): 149 – 153.  
SUN Jun, WU Xiaohong, ZHANG Xiaodong, et al. Lettuce image target clustering segmentation based on MFICSC algorithm[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(13): 149 – 153. (in Chinese)
- 15 BULANON D M, KATAOKA T, OTA Y, et al. Automation and emerging technologies: a segmentation algorithm for the automatic recognition of Fuji apples at harvest[J]. *Biosystems Engineering*, 2002, 83(4): 405 – 412.
- 16 杨勇, 张志勇, 李旭, 等. 光源光谱对标志逆反射系数的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(1): 12 – 14.  
YANG Yong, ZHANG Zhiyong, LI Xu, et al. Study on influence of source spectra on retro-reflection coefficient [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(1): 12 – 14. (in Chinese)
- 17 洪楠, 侯军. MINITAB 统计分析教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- 18 冯娟, 刘刚, 司永胜, 等. 苹果采摘机器人激光视觉系统的构建[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(增刊1): 32 – 37.  
FENG Juan, LIU Gang, SI Yongsheng, et al. Construction of laser vision system for apple harvesting robot[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(Sup. 1): 32 – 37. (in Chinese)
- 19 崔永杰, 苏帅, 王霞霞, 等. 基于机器视觉的自然环境中猕猴桃识别与特征提取[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(5): 247 – 252.  
CUI Yongjie, SU Shuai, WANG Xiaxia, et al. Recognition and feature extraction of kiwifruit in natural environment based on machine vision[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5): 247 – 252. (in Chinese)
- 20 吕继东, 赵德安, 姬伟. 苹果采摘机器人目标果实快速跟踪识别方法[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 65 – 72.  
Lǚ Jidong, ZHAO Dean, JI Wei. Fast tracing recognition method of target fruit for apple harvesting robot[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1): 65 – 72. (in Chinese)
- 21 李国利, 姬长英, 顾宝兴. 基于单目视觉与超声检测的振荡果实采摘识别与定位[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 1 – 8.  
LI Guoli, JI Changying, GU Baoxing. Recognition and location of oscillating fruit based on monocular vision and ultrasonic testing [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 1 – 8. (in Chinese)
- 22 项荣. 开放环境中番茄的双目立体视觉识别与定位[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.  
XIANG Rong. Recognition and localization for tomatoes under open environment based on binocular stereo vision[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)