

刘 波, 杨长辉, 熊龙焯, 等. 果园自然环境下采摘机器人路径识别方法[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(5): 1222-1231.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.05.032

果园自然环境下采摘机器人路径识别方法

刘 波¹, 杨长辉^{1,3}, 熊龙焯¹, 王 恺¹, 王 毅^{1,2}

(1. 重庆理工大学机械工程学院, 重庆 400054; 2. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044; 3. 西安交通大学机械工程学院, 陕西西安 710049)

摘要: 果园自然环境下光照条件是不同的, 而不同的光照条件又会对采摘机器人的路径导航产生不同影响, 针对此环境, 本研究提出了一种根据光照度进行分类并使用不同算法提取道路中心线的方法。首先对图像亮度分量和光照度进行研究, 并将光照度划分为低光照、正常光照和高光照 3 个等级。在低光照条件下通过分离出 S 通道, 然后利用 K-means 与 Ncut 算法对其进行分割, 在正常光照条件下采用 Otsu 算法对 S 通道进行分割, 在高光照条件下则通过 K-means 与 Ncut 算法对 Cg、Cb 与 Cr 通道进行差分运算后的图像进行分割。将分割后的图像进行边缘检测并提取道路轮廓, 并通过最小二乘法实现道路中心线的获取。最后选用 150 张不同光照条件下的图像进行了静态试验验证, 并通过课题组自行研制的采摘机器人进行了动态试验验证, 静态试验验证结果表明, 3 种光照条件下图像分割区域与道路真实区域的平均重合度为 96.74%、平均分割误差为 2.01%、平均道路中心线平均偏差为 2.71 像素, 平均耗时为 0.182 s; 动态试验验证结果表明, 3 种光照条件下的平均横向偏移距离为 3.1 cm。表明, 该方法在不同光照条件下具有较高的精度和实时性, 能够满足采摘机器人在自然光照条件下的路径识别及导航需求。

关键词: 果园环境; 采摘机器人; 道路中心线; 光照条件

中图分类号: TP249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)05-1222-10

Path recognition method of picking robot based on orchard natural environment

LIU Bo¹, YANG Chang-hui^{1,3}, XIONG Long-ye¹, WANG Kai¹, WANG Yi^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The light conditions are different in the natural environment of orchard, and different light conditions will have different effects on the path navigation of the picking robot. In response to this environment, a method of classifying road centerlines based on illumination intensity and extracting road centerlines using different algorithms was proposed. Firstly, the image brightness component and light intensity were studied, and the light intensity was divided into three levels: low light, normal light and high light. The S channel was separated under low light condition, then K-means and Ncut algorithm were used to segment it. The S channel was segmented by Otsu algorithm under normal illumination condition. Under the high-light

condition, K-means and Ncut algorithm were used to segment images after differential operation in Cg, Cb and Cr channels. The segmented image was used for edge detection and road contour extraction, and the road center line was acquired by the least squares method. Finally, 150 images under different light conditions were selected for static experiment verification, and the dynamic experiments were verified by the picking robot developed by the research

收稿日期: 2018-12-13

基金项目: 重庆市重点产业共性关键技术创新专项 (CSTC2015zdcy-ztx70003); 重庆市基础研究与前沿探索一般项目 (cstc2018jcyjAX0071); 重庆市基础科学与前沿技术研究一般项目 (cstc2016jcyjA0444)

作者简介: 刘 波 (1991-), 男, 河北衡水人, 硕士研究生, 研究方向为智能化山地农机。(E-mail) 865845736@qq.com

通讯作者: 王 毅 (E-mail) wangyi_cqut@163.com

team. The static experimental verification results showed that the average coincidence degree between the image segmentation region and the real road region under the three light conditions was 96.74%, the average segmentation error was 2.01%, and the average deviation of average road centerline was 2.71 pixels, the average time was 0.182 s. The dynamic experimental verification results showed that the average lateral offset distance under three light conditions was 3.1 cm. These results indicate that the method has high precision and real-time, performance under different light conditions and can meet the path recognition and navigation requirements of the picking robot under natural light condition.

Key words: orchard environment; picking robot; road centerline; light condition

农业机器人常用的导航技术主要有 GPS、多传感器融合以及机器视觉等^[1-2]。随着机器视觉研究的深入以及图像处理技术的快速发展,基于视觉的导航技术成为当下研究的热点。

基于机器视觉的农业机器人导航技术主要是通过视觉传感器采集田间、温室以及果园等环境信息,然后通过图像处理的方法生成导航线,最后通过控制机器人沿着导航线行进以完成对机器人的移动导航。目前一般是通过 Hough 变换和最小二乘法得到导航线,而准确提取导航线的关键在于对视觉传感器采集到的图像有一个较好的分割效果。由于非结构环境中光线变化以及遮挡等问题的存在,往往导致分割的效果不佳。为了解决上述问题,国内外学者均展开了相关研究。王新忠等^[3]、王小娟等^[4]采用在 HIS 空间下根据 I 分量直方图通过最大类间方差法 (Otsu) 对图像进行自适应阈值分割,李茗萱等^[5]、何洁等^[6]通过 Otsu 对 RGB 颜色空间下的 2G-R-B 以及 G-R 分量图像进行分割。王红君等^[7]利用最大类间方差法对 RGB 空间各分量进行处理得到的差值图像以及 HIS 空间下的 H 分量图像进行分割。宋宇等^[8]通过对传统的 2G-R-B 算法进行改进,用 Matlab 对事先采集的大量样本图片进行 G-R-B 分量的关系分析,根据分析的结果重新设定不同分量的系数,然后通过最大类间方差法对其进行分割。高国琴等^[9]、王睿^[10]通过 K-means 算法对 HIS 空间下 H 分量进行分割,孟庆宽等^[11]则是采用改进的 K-means 算法对 2Cg-Cr-Cb 灰度图像进行分割。Astrand 等^[12]通过阈值分割获取二值图,并采用 Hough 变换获取导航线。Montalvo 等^[13]通过采用 2 次 Otsu 算法来提取作物行检测的像素,并通过最小二乘法拟合导航线。Romeo 等^[14]提出采用基于聚类模糊分割方法和基于先验知识与成像几何约束来检测玉米作物行。Radcliffe 等^[15]提出一种以天空与果树树冠为背景的中心线检测算法,能够快速提取导航线,但是对环境的要求较高。

以上研究方法大多采用 Otsu 和 K-means 分割算法对不同颜色空间下的各分量图像进行分割来克服光线的干扰,但未见不同光线条件下的试验验证。本研究针对果园自然环境,提出了根据不同光照度采用不同的分割算法对图像进行分割的方法,并对不同光照度下的分割效果进行了分析。

1 材料与方法

1.1 果园环境

不同于其他环境,绝大多数果园环境都可以划分为道路区域和果树区域。图 1 为果园环境的简单示意图。为了方便采摘机器人进行采摘作业,通常会对果园道路进行特殊的处理,处理之后的道路与周围环境会存在着明显的特征差异,因此,可以利用道路与环境之间的差异对其进行处理提取出道路的中线并让采摘机器人沿着这条中线行进。图 2 为处理后的真实果园环境,图 3 为课题组自行研制的采摘机器人在果园道路上行进的过程。

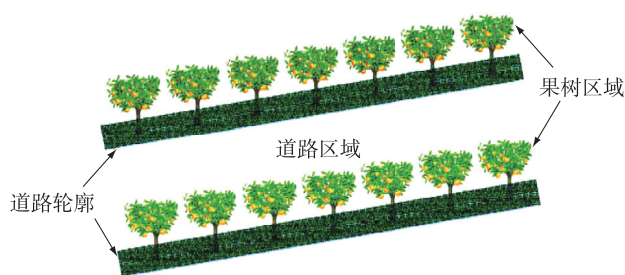


图 1 果园环境示意图

Fig.1 Schematic map of orchard environment

1.2 果园道路图像处理

1.2.1 光照度等级划分

自然环境中的光照条件时时刻刻都在发生变化,因此在采摘机器人行进的过程中,摄像机所采集的果园道路图像的质量会受到严重的干扰。为了克服光照变化对导航带来的影响,通过判断光照度并



图 2 处理后的真实果园环境

Fig.2 Real orchard environment after treatment



图 3 采摘机器人在果园道路行进

Fig.3 Picking robots marching on orchard road

对其进行等级划分,根据不同的光照度采取不同的处理方法有着不错的效果。武星等^[16]通过试验得出图像亮度与摄像机视野内光照度存在近似线性的关系,因此考虑通过计算图像亮度值的标准差来对光照度进行判断。图像亮度的计算公式为:

$$Y = [(299 * R) + (587 * G) + (114 * B)] / 1\ 000 \quad (1)$$

式中 R 为 RGB 颜色空间 R 通道的值; G 为 RGB 颜色空间 G 通道的值; B 为 RGB 颜色空间 B 通道的值。

由(1)可以得到图像亮度的均值为:

$$u = \frac{Y}{M \times N} \quad (2)$$

由(2)可以得到图像亮度的标准差为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [P_{(i,j)} - u]^2} \quad (3)$$

式中 $M \times N$ 表示图像的大小, $P_{(i,j)}$ 表示第 i 行 j 列的像素值, u 表示图像亮度的均值。

光照度可以分为 3 类:低光照、正常光照和高光照^[17],3 种不同光照度的图片分别在果园环境的阴天(光照度在 2 000 ~ 8 000 lx)、多云(光照度在 10 000 ~ 35 000 lx)和晴天(光照度在 40 000 ~ 80 000 lx)条件下进行采集。图 4 为采摘机器人采集果园道路图像示意图,通过前端的 CCD 相机与水平方向成 45° 的俯仰角进行采集。图 5 为采集到的不同光照情况下的果园道路图像。

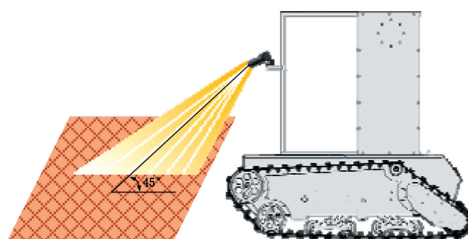


图 4 采集果园道路图像示意图

Fig.4 Schematic diagram for collecting images of orchard roads



a 为低光照的图像,因光照不足图像整体亮度较低;b 为正常光照的图像,图像显得清晰明亮;c 为高光照的图像,因光照过强出现了部分阴影。

图 5 不同光照条件下的果园道路图像

Fig.5 Images of orchard road under different light conditions

为了验证图片亮度与光照度关系的合理性,在 3 种不同环境下分别采集 200 张果园道路图片,并进行了试验,试验结果如图 6 所示。

由试验结果可以发现不同光照度的果园道

路图像亮度值的标准差不同,其中低光照、正常光照和高光照条件下的图片亮度值分别主要集中在 25.5 ± 2.5 、 53.0 ± 4.0 和 67.0 ± 3.0 区间范围内。

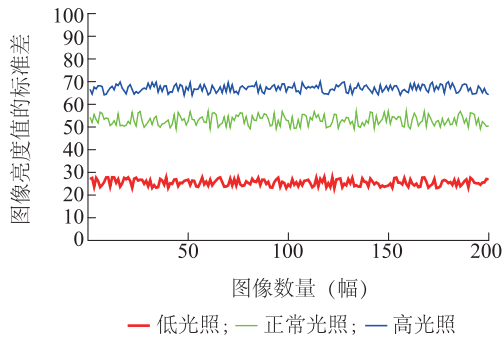


图6 图片亮度与光照度的关系

Fig.6 Relationship between image brightness and illuminance

$$\begin{cases} \sigma_{(i,j)} \leq \sigma_1 & \text{低光照} \\ \sigma_1 \leq \sigma_{(i,j)} \leq \sigma_2 & \text{正常光照} \\ \sigma_{(i,j)} \geq \sigma_2 & \text{高光照} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\sigma_{(i,j)}$ 代表图像的亮度值的标准差; σ_1 代表低光照亮度值的标准差(25.5); σ_2 代表高光照亮度值的标准差(67.0)。

1.2.2 颜色空间转换 不同光照度下的图像亮度值不同,RGB 颜色空间对于低光照以及高光照条件下的图像分割效果并不是很理想,因此在处理低光照和高光照条件下的果园道路图像时需要将其转换到不同的颜色空间,HSV 颜色空间和 YCrCb 颜色空间通常用于非正常光照条件下的图像分割^[18],因此

在对低光照和高光照条件下果园道路图像进行分割前需要将其从 RGB 颜色空间转换到 HSV 颜色空间和 YCrCb 颜色空间,其中 RGB 颜色空间与 HSV 颜色空间的转换关系式为:

$$\begin{aligned} V &= \max(R, G, B) \\ S &= \begin{cases} \frac{V - \min(R, G, B)}{V} & V \neq 0 \\ 0 & \text{other wise} \end{cases} \\ H &= \begin{cases} 60(G - B)/(V - \min(R, G, B)) & V = R \\ 120 + 60(B - R)/(V - \min(R, G, B)) & V = G \\ 240 + 60(R - G)/(V - \min(R, G, B)) & V = B \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

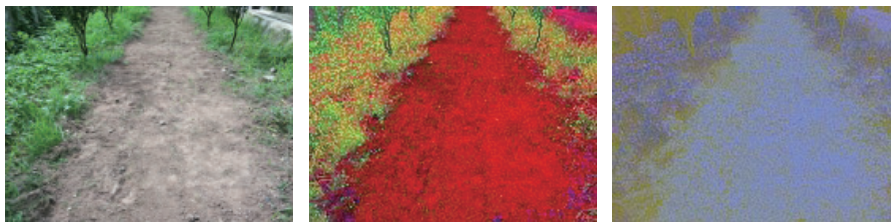
式中 R, G, B 代表相应的颜色空间, $R, G, B \in (0, 1)$ 。

RGB 颜色空间与 YCrCb 颜色空间的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cr \\ Cb \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0 & 0.578 & 0 & 0.114 & 0 \\ 0.500 & 0 & -0.418 & 7 & -0.081 & 3 \\ -0.168 & 7 & -0.331 & 3 & 0.500 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 R, G, B 代表相应的颜色空间, $R, G, B \in (0, 1)$ 。

根据上述公式对其进行颜色空间转换的效果如图7所示。



a:RGB 颜色空间;b:HSV 颜色空间;c:YCrCb 颜色空间

图7 颜色空间转换

Fig.7 Color space conversion

1.3 道路中心线获取

为消除光照度变化对导引路径图像质量的影响,首先找出光照度与果园道路图像亮度之间的判断关系,根据二者之间的判断关系将其划分为低光照、正常光照和高光照3个等级,并根据不同的等级采用不同的处理方法。对于低光照条件的图像,通过将图像从 RGB 颜色空间转换到 HSV 颜色空间并分离出 S 通道下的图像,然后通过 K-means 聚类算

法和 Ncut 分割算法对其进行分割;对于正常光照条件下的图像仅需通过 Otsu 分割算法对其 S 通道图像进行分割;对于高光照条件下的图像,则需要将图像从 RGB 颜色空间转换到 YCrCb 颜色空间并将分离出来的 C_g 、 C_r 及 C_b 通道图像进行差分运算,然后通过 K-means 聚类算法和 Ncut 分割算法对差分运算得到的图像进行分割。在完成分割的基础上通过边缘检测算法对其进行轮廓提取得到果园道路的

真实轮廓,与此同时,提取轮廓上的坐标点并通过最小二乘法拟合出轮廓线,最后通过求解轮廓线的中线获取果园道路的导航中心线。完整的流程如图8所示。

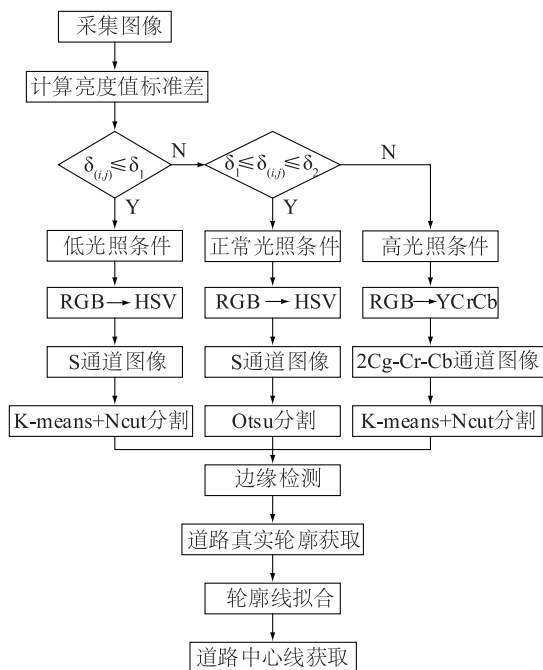


图8 道路中心线获取流程图

Fig.8 Flow chart of road center line acquisition

2 结果与分析

2.1 低光照条件下的果园道路图像分割

K-means 算法是聚类算法中最常用的一种,具有简单、快速、准确等优点。对于 K-means 聚类算法来说,理论上 K 值取得越大,分类结果越准确,但是由于果园道路环境特殊加上 K 值越大运行速度越慢。因此将 K 值设定为 2,即将果园道路图像分为进行道路和背景 2 类。为了达到更好的分割效果,在分割之前将果园道路图像从 RGB 颜色空间转换到 HSV 颜色空间并分离出 S 通道图像,K-means 聚类分割的结果如图 9 所示。

为了后续更好地提取果园道路的真实轮廓,在 K-means 聚类分割的基础上通过 Ncut 算法对其进行进一步的分割。Ncut 算法是由 Shi 等^[19]于 1997 年提出的分割算法,该算法主要是基于图论的思想,将 V 定义为图像中的所有顶点的集合, E 定义为包含这些顶点的边的集合,通过移除连接 2 个部分的

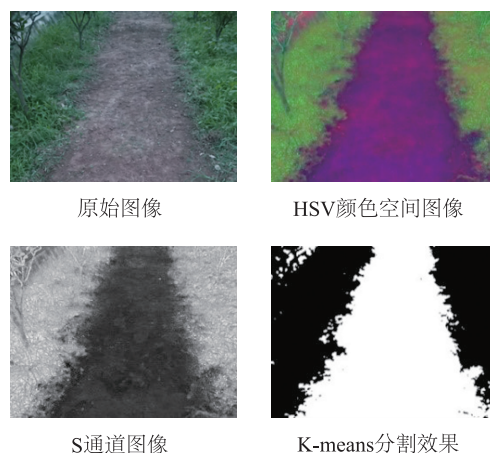


图9 低光照条件下的果园道路图像 K-means 聚类算法分割结果

Fig.9 Segmentation result of orchard road image under low light condition by K-means

边则可以将图像 $G=(V,E)$ 分割成 2 个独立的子集 A,B ,其中 A,B 2 个子集间的相似程度可以表示为:

$$cut(A,B) = \sum_{u \in A, v \in B} w(u,v) \quad (7)$$

式中: $u \in \{A\}$, $v \in \{B\}$ $w(u,v)$ 为 u 和 v 之间的相似度函数。

A,B 两个子集间的不相关度可以表示为:

$$Ncut(A,B) = \frac{cut(A,B)}{assoc(A,V)} + \frac{cut(A,B)}{assoc(B,V)} \quad (8)$$

式中 $asso(A,V) = \sum_{u \in A, t \in V} w(u,t)$, $asso(B,V) = \sum_{u \in B, t \in V} w(u,t)$, $asso(A,V)$ 表示 A 中所有点与图中所有点相连的权重; $asso(B,V)$ 表示 B 中所有点与图中所有点相连的权重。

当 $Ncut(A,B)$ 取得最小值时分割方案为最优, Ncut 算法的具体步骤如下:

1) 建立权值图 $G=(V,E,W)$, 求解邻接矩阵 W 和度矩阵 D ;

2) 将矩阵 W 和矩阵 D 进行特征值分解, 找出第三小的特征向量;

3) 利用求解得到的第三小的特征向量将图像分割为 3 个部分;

4) 将分割后的图像重复以上过程直到达到最大分裂值(N)时停止分割(本研究取 $N=3$)。

通过 Ncut 算法对 K-means 分割后的图像进行分割(图 10)。可以看到通过 Ncut 算法对 K-means 分割得到的图像进行二次分割后道路区域和背景区

域已经被准确地分割成三部分,有利于后续提取道路的真实轮廓。



图 10 低光照条件下的果园道路图像 Ncut 算法二次分割效果

Fig.10 Secondary segmentation of orchard road under low light condition by Ncut

2.2 正常光照条件下的果园道路图像分割

正常光照条件下的果园道路图像易于分割,本研究采用了 Otsu 算法对 HSV 空间下的 S 通道图像进行分割。

图 11 为通过 Otsu 算法对正常光照条件下的果园道路图像分割的结果,由分割结果可以看出,HSV 空间下的 S 通道图像道路与背景对比度明显,直方图中出现明显的波峰波谷,具有良好的分割特性。

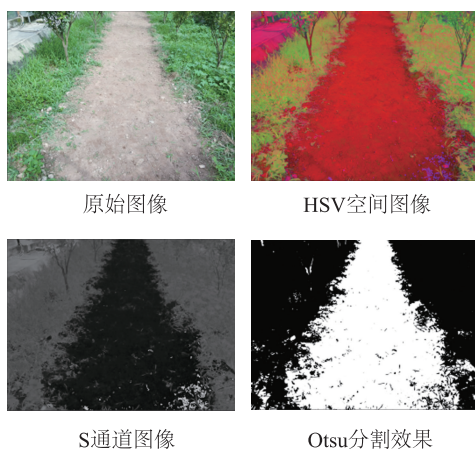


图 11 正常光照条件下的果园道路图像 Otsu 算法分割结果

Fig.11 Segmentation result of orchard road image under normal light condition by Otsu

经过 Otsu 算法分割后的图像仍有部分背景区域,通过最大连通域法去除背景区域,结果如图 12 所示。然后通过形态学处理及面积筛选的方法对最大连通域进行处理,处理的结果如图 13 所示。可以看到果园道路图像中的道路和背景被较好的分割成了 2 个部分。



图 12 最大连通域法处理后的图像

Fig.12 Image processed by maximum connected domain method



图 13 形态学处理后的图像

Fig.13 Image processed by morphology

2.3 高光照条件下的果园道路图像分割

由于阴影的存在,高光照条件下的果园道路图像分割效果不理想,本研究将果园道路图像从 RGB 颜色空间转换到 YCrCb 颜色空间并通过 Cg 通道、Cr 通道以及 Cb 通道进行差分运算来消除阴影部分对分割带来的影响。分割的结果如图 14 所示,可以看到通过构建 $2Cg-Cr-Cb$ 因子有效地抑制了阴影, K-means 和 Ncut 算法的结合很好地将道路和背景分割开来。

2.4 果园道路中心线提取

在完成果园道路与背景分割的基础上,本研究通过 Canny 边缘算法对其进行轮廓提取,提取的结果如图 15 所示。可以看到在 3 种不同光照条件下提取到的轮廓与道路的真实轮廓高度重合。

在获取道路真实轮廓的基础上,提取出左右轮廓的坐标点分别记为:

$$(x_i, y_i), i = 1, 2, 3, \dots, m \text{ 和 } (x_k, y_k), k = 1, 2, 3, \dots, n$$

通过最小二乘法对其进行直线拟合,设左边轮廓拟合的直线的表达式为: $L_1(x) = a_1 + b_1x$,右边轮廓拟合的直线的表达式为: $L_2(x) = a_2 + b_2x$,则均方差的表达式为:

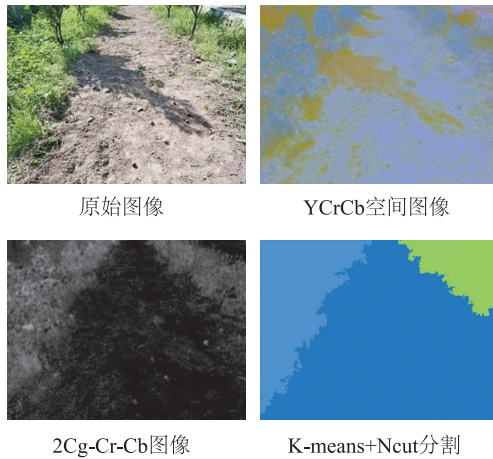


图 14 高光照条件下的果园道路图像 K-means+Ncut 分割结果
Fig.14 Segmentation result of orchard road image under high light condition by K-means and Ncut

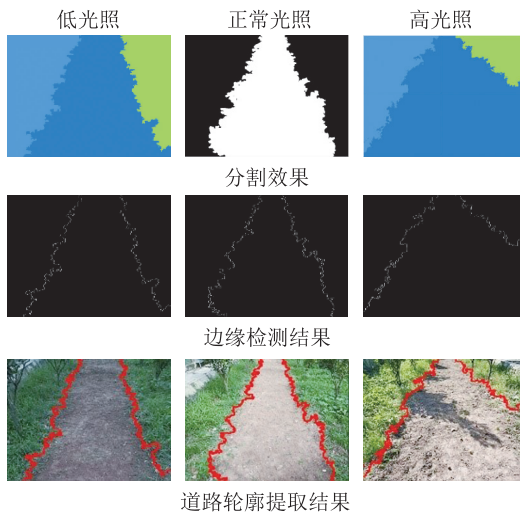


图 15 道路轮廓提取过程
Fig.15 Extraction process of road contour

$$Q(a_1, b_1) = \sum_{i=1}^m [L_1(x_i) - y_i]^2 = \sum_{i=1}^m (a_1 + b_1 x_i - y_i)^2$$

$$Q(a_2, b_2) = \sum_{k=1}^n [L_2(x_k) - y_k]^2 = \sum_{k=1}^n (a_2 + b_2 x_k - y_k)^2 \quad (9)$$

由微积分极值定义可知, $Q(a_1, b_1)$ 达到极小值时, a_1, b_1 满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q(a_1, b_1)}{\partial a_1} = 2 \sum_{i=1}^m (a_1 + b_1 x_i - y_i) = 0 \\ \frac{\partial Q(a_1, b_1)}{\partial b_1} = 2 \sum_{i=1}^m (a_1 + b_1 x_i - y_i) x_i = 0 \end{cases} \quad (10)$$

整理得到拟合直线满足:

$$\begin{pmatrix} m & \sum_{i=1}^m x_i \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^m y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i y_i \end{pmatrix} \quad (11)$$

由 Cramer 法则解得:

$$a_1 = (\sum_{i=1}^m y_i \sum_{i=1}^m x_i^2 - \sum_{i=1}^m x_i \sum_{i=1}^m x_i y_i) / [m \sum_{i=1}^m x_i^2 - (\sum_{i=1}^m x_i)^2]$$

$$b_1 = (m \sum_{i=1}^m x_i y_i - \sum_{i=1}^m x_i \sum_{i=1}^m y_i) / [m \sum_{i=1}^m x_i^2 - (\sum_{i=1}^m x_i)^2] \quad (12)$$

同理可得:

$$a_2 = (\sum_{k=1}^n y_k \sum_{k=1}^n x_k^2 - \sum_{k=1}^n x_k \sum_{k=1}^n x_k y_k) / [n \sum_{k=1}^n x_k^2 - (\sum_{k=1}^n x_k)^2]$$

$$b_2 = (n \sum_{k=1}^n x_k y_k - \sum_{k=1}^n x_k \sum_{k=1}^n y_k) / [n \sum_{k=1}^n x_k^2 - (\sum_{k=1}^n x_k)^2] \quad (13)$$

得到上述 2 条直线的表达式之后,在其中一条直线上任取 2 个坐标点: $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$, 将其纵坐标带入另外一条直线求出对应的 2 个横坐标值, 将其记为 x_3, x_4 , 由此可以得到 2 条直线上的 4 个坐标点分别为: $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_1), (x_4, y_2)$ 。通过求解其对应的 2 个中点值的坐标即可得到 2 个新的坐标点: $(\frac{x_1 + x_3}{2}, y_1), (\frac{x_2 + x_4}{2}, y_2)$, 利用这 2 个新的坐标即可求出 2 条直线的中线, 轮廓拟合直线以及轮廓中线, 结果如图 16 所示。

2.5 图像分割效果验证

2.5.1 验证条件 为了验证本研究方法的可行性, 分别采用了静态和动态 2 种试验方案进行验证。

2.5.1.1 静态试验 选用了不同光照条件下的图片各 50 张进行试验, 采集图像的设备为 CCD 工业相机, 所采集的图像均为 bmp 格式, 分辨率为 1280×1024 像素。为了准确得到果园道路图像的真实面积, 采用人工的方法用绳子将果园道路围成一个封闭的区域, 通过计算这个封闭的区域得到果园道路图像的真实像素面积。通过人工测量的方法得到道路两端的中点, 以过这 2 个点的直线作为实际的果园道路中线, 将通过上述方法得到的封闭区域面积和中线作为标准, 与本研究方法得到的分割面积以及提取的道路中线进行对比。同时, 为了考察本研

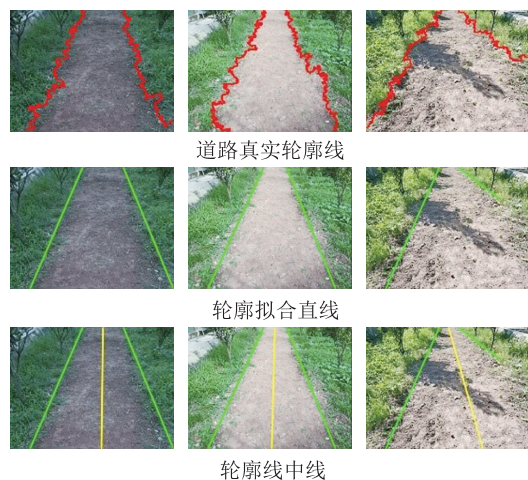


图 16 道路中心线提取结果
Fig.16 Extraction result of road centerline

究方法的效率,分别计算出 3 种不同光照条件下的图像处理的平均耗时。

2.5.1.2 动态试验 为测量采摘机器人的实际导航效果,通过搭建导航系统在果园环境中进行自主导航试验,导航速度保持在 0.25 m/s,采用间歇式的导航运动,间歇距离设置为 1 m,通过记录机器人实际运动的中点到果园两侧边界的距离来判定导航实际误差。



以上所有试验过程均在 3.10 HZ 处理器、10 GB 内存、64 位操作系统的 PC 上完成,试验程序均在 Opencv3.1+Qt5.8 环境下编写和运行。图 17 为静态与动态试验。

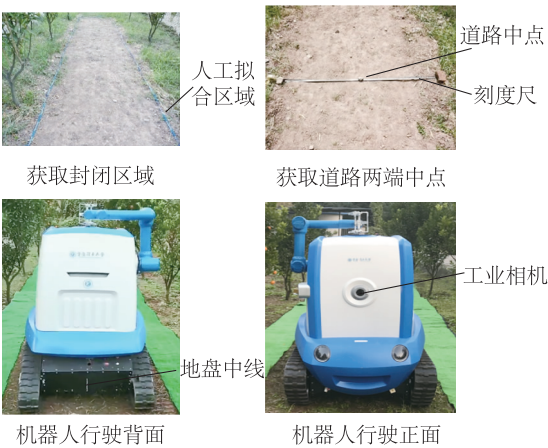


图 17 动态与静态试验
Fig.17 Dynamic and static experiments

2.5.2 验证结果 对测试图像进行静态试验对比的结果如图 18 所示。通过对比利用本研究方法得到的分割区域和道路中线和采用人工方法得到的封闭区域和道路中线可以发现,本研究方法能够准确有效地对果园道路进行分割和中线提取。

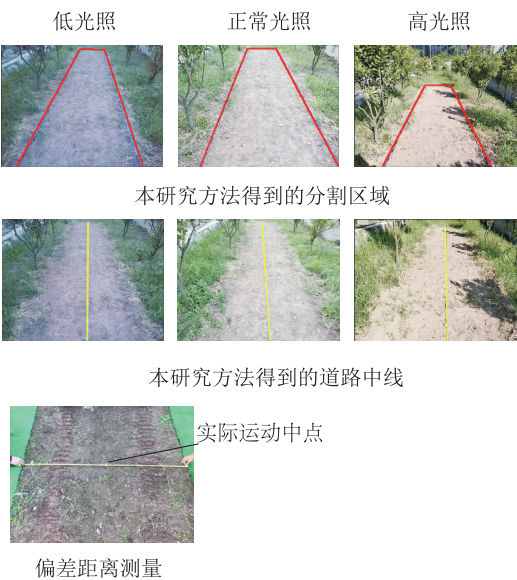


图 18 道路中线提取试验结果对比
Fig.18 Comparison of road centerline extraction results

本研究对静态实验,通过引入封闭区域的重合度、分割误差和道路中线的偏差来作为道路中线提

取精度的评价指标。重合度的计算公式如下：

$$d = (S_i \cap S) / S \times 100\% \tag{14}$$

式中 S_i 表示本研究分割得到区域的面积(像素), S 表示通过人工方法得到的封闭区域面积, $S_i \cap S$ 表示 2 个区域重合部分的面积, 重合度越大说明分割效果越好。

分割误差计算公式如下：

$$e = (S_i - S) / S \times 100\% \tag{15}$$

偏差计算公式为：

$$De = R_s / L \times 100\% \tag{16}$$

式中 R_s 为 2 条中线之间封闭区域的面积。

L 为通过人工方法得到的道路中线的长度, 偏差越小说明提取道路中心线越准确。

3 种不同光照条件下的果园道路图像的试验结果如图 19~图 21 所示, 图 21 为偏差统计曲线, 数据统计结果如表 1~表 4 所示。

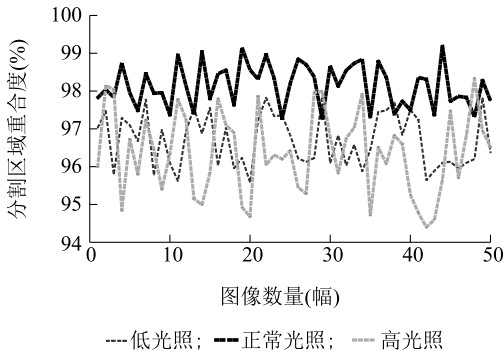


图 19 重合度统计曲线
Fig.19 Statistical curve of coincidence degree

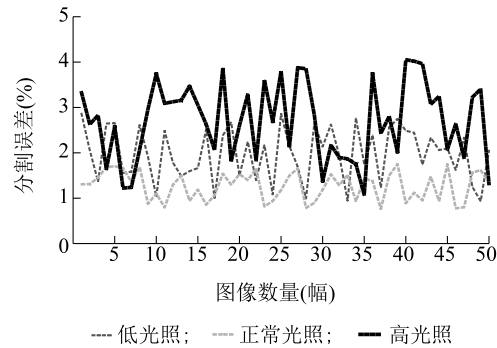


图 20 分割误差统计曲线
Fig.20 Statistical curve of segmentation error

本研究对动态试验采用记录导航中心线的横向偏移距离来判定导航线的误差, 移动机器人在 3 种不同的光照度下进行试验, 横向偏差曲线如图 22 所示。

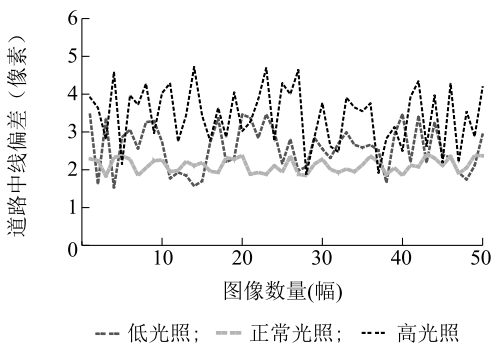


图 21 偏差统计曲线
Fig.21 Statistical curve of deviation

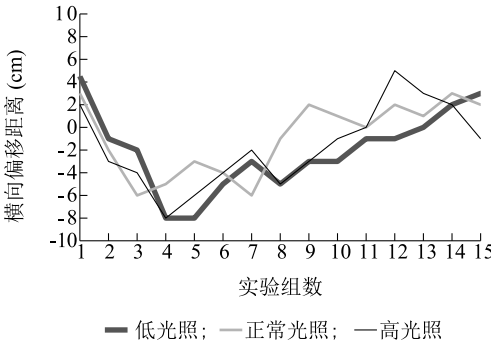


图 22 偏差距离统计曲线
Fig.22 Statistical curve of deviation distance

表 1 平均重合度统计结果

Table 1 Statistical results of average coincidence degree

光照条件	图像数(幅)	重合度(%)
低光照	50	96.34
正常光照	50	98.23
高光照	50	95.66

表 2 平均分割误差统计结果

Table 2 Statistical results of average segmentation error

光照条件	图像数(幅)	分割误差(%)
低光照	50	1.98
正常光照	50	1.36
高光照	50	2.67

表 3 平均偏差统计结果

Table 3 Statistical results of average deviation

光照条件	图像数(幅)	偏差(像素)
低光照	50	2.58
正常光照	50	2.12
高光照	50	3.43

表 4 平均耗时统计结果

Table 4 Statistical results of average time-consuming

光照条件	图像数(幅)	处理时间(s)
低光照	50	0.184
正常光照	50	0.176
高光照	50	0.185

由图 19~图 21 可知,3 种光照条件下,正常光照下的图像分割重合度、分割误差以及提取的道路中心线的偏差最小,高光照下的图像分割重合度、分割误差以及提取的道路中线的偏差最大,低光照下的分割重合度、分割误差以及偏差则介于二者之间,这也说明光照过暗或过强都会影响到图像的分割效果,但是从表 1~表 3 可以发现 3 种不同光照条件下分割区域的平均重合度为 96.74%,分割的平均误差为 2.01%,提取的道路中线跟实际的道路中线平均偏差仅为 2.71 像素。由图 22 分析可知,在低光照、高光照和正常光照的平均横向偏差距离分别为 3.3 cm、3.2 cm、2.7 cm,从表 4 可知在不同光照条件下的图像识别的平均耗时为 0.182 s。由此可见,本研究对于不同光照度均有较好的适应性和实时性,且提取的道路中线具有较高的精度。

3 结 论

为了实现复杂光照条件下道路中心线的准确提取,提出了一种按照光照度等级选择相应分割算法的分类方法。建立了光照度与果园道路图像亮度的判别关系,根据二者之间的关系将其分为低光照、正常光照和高光照,根据不同的光照度等级综合运用 K-means 聚类算法、Ncut 算法以及 Otsu 算法对其进行分割,并结合边缘检测和最小二乘法实现了道路中心线的拟合。试验结果表明,本研究提出的方法对不同光照度具有较强的适应性,分割的平均重合度为 96.74%,平均分割误差为 2.01%,导航中心线的平均偏差仅为 2.71 像素。平均横向偏差距离为 3.1 cm,识别平均耗时为 0.182 s。

本研究提出的方法针对果园道路和背景之间存在较为明显特征差异的时候效果较好,但对于果园道路和背景之间没有显著特征差异的时候不能很好地将其分割开来,这一问题的解决还有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 刁智华,王会丹,宋寅卯.基于机器视觉的农田机械导航线提取算法研究[J].农机化研究,2015(2):35-39.
- [2] 梁传君,尚雪莲.基于立体视觉的温室作业机器人障碍物检测方法[J].江苏农业科学,2017,45(14):175-178.
- [3] 王新忠,韩旭,毛罕平,等.基于最小二乘法的温室番茄垄间视觉导航路径检测[J].农业机械学报,2012,43(6):161-166.
- [4] 王小娟,李云伍,刘得雄,等.基于机器视觉的丘陵山区田间道路虚拟中线提取方法[J].西南大学学报(自然科学版),2018,40(4):162-169.
- [5] 李茗菡,张漫,孟庆宽,等.基于扫描滤波的农机具视觉导航基准线快速检测方法[J].农业工程学报,2013,29(1):41-47.
- [6] 何洁,孟庆宽,张漫,等.基于边缘检测与扫描滤波的农机导航基准线提取方法[J].农业机械学报,2014,45(S1):265-270.
- [7] 王红君,陈慧,岳有军,等.基于多颜色空间分割的温室环境视觉导航路径信息提取[J].江苏农业科学,2017,45(16):202-206.
- [8] 宋宇,刘永博,刘路,等.基于机器视觉的玉米根茎导航基准线提取方法[J].农业机械学报,2017,48(2):38-44.
- [9] 高国琴,李明.基于 K-means 算法的温室移动机器人导航路径识别[J].农业工程学报,2014,30(7):25-33.
- [10] 王睿.基于 K-means 算法的温室移动机器人导航路径识别[J].电子技术与软件工程,2017(23):80.
- [11] 孟庆宽,张漫,杨耿煌,等.自然光照下基于粒子群算法的农业机械导航路径识别[J].农业机械学报,2016,47(6):11-20.
- [12] ASTRAND B,BAERVELDT A J.A vision based row-following system for agricultural field machinery[J].Mechatronics,2006,15(2):251-269.
- [13] MONTALVO M,PAJARES G, GUERRERO J M, et al. Automatic detection of crop rows in maize fields with high weeds pressure[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(15): 11889-11897.
- [14] ROMEO J,PAJARES G,MONTALVO M,et al.Crop row detection in maize fields inspired on the human visual perception[J].The Scientific World Journal,2012,2012:1-10.
- [15] RADCLIFFE J, COX J, BULANON D M. Machine vision for orchard navigation[J].Computers in Industry,2018,98:165-171.
- [16] 武星,张颖,李林慧,等.复杂光照条件下视觉引导 AGV 路径提取方法[J].农业机械学报,2017,48(10):15-24.
- [17] 毛方东,许洪斌,王毅,等.基于 VB/Matlab 的果园移动机器人路径识别系统[J].计算机工程,2017,43(12):309-314.
- [18] 孟庆宽,何洁,仇瑞承,等.基于机器视觉的自然环境下作物行识别与导航线提取[J].光学学报,2014,34(7):180-186.
- [19] SHI J,MALIK J.Normalized cuts and image segmentation[J].IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2000,22(8):888-905.

(责任编辑:陈海霞)